

Université du Québec
INRS-Eau

**IMPACT DU REMPLACEMENT DES CONDUITES D'AQUEDUC
SUR LE NOMBRE ANNUEL DE BRIS**

Par
Geneviève Pelletier
M. Sc. A.

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

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

M. Michel Trépanier, professeur
INRS-Urbanisation

Examineur interne

M. Pierre Lavallée, professeur invité
INRS-Eau et vice-président exécutif du
Groupe-conseil BPR

Examineur externe

M. Bernard Brémond, directeur de recherche
Ouvrages et réseaux hydrauliques du CEMAGREF,
Groupement de Bordeaux, Département Équipements
pour l'eau et l'environnement

Examineur externe

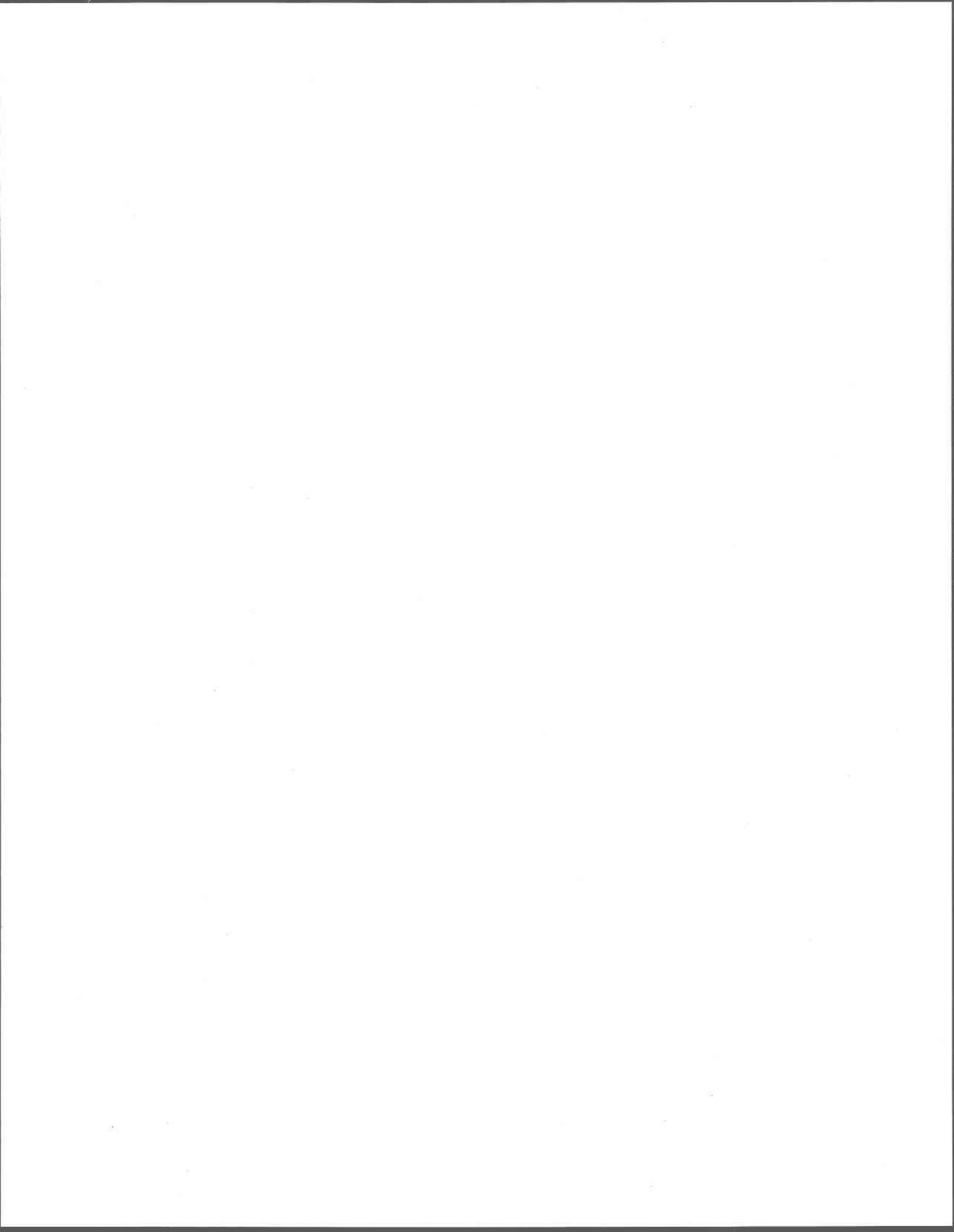
M. Guy A. Félio, chargé de projet
Guide technique national des infrastructures
municipales, Institut de recherche en construction,
Conseil national de recherches du Canada

Directeur de recherche

M. Jean-Pierre Villeneuve, directeur et professeur
INRS-Eau

10 avril 2000

©Droits réservés de *Geneviève Pelletier* 2000



RÉSUMÉ

L'état des infrastructures municipales est inquiétant et semble se détériorer rapidement. Des outils doivent être développés pour évaluer l'état structural présent et futur de ces infrastructures. Une stratégie de modélisation, inspirée de l'analyse de survie et utilisant le nombre annuel de bris répertoriés (historique de réparations) sur les conduites d'aqueduc comme indicateur de l'état structural d'un réseau d'aqueduc, a été développée pour des municipalités possédant de courts historiques de bris. La prédiction des bris d'aqueduc dépend fortement du nombre de bris déjà recensés sur les conduites. En effet, le fait qu'une conduite ait déjà brisé est un bon indicateur du fait qu'elle brisera de nouveau. Afin de tenir compte de cette observation, les données relatives aux bris de conduites d'aqueduc ont été séparées en deux strates qui ont été modélisées séparément : les premiers bris et les bris subséquents. Le modèle simple à trois paramètres développé requiert un minimum de données, généralement faciles à obtenir même dans des municipalités disposant de peu de données.

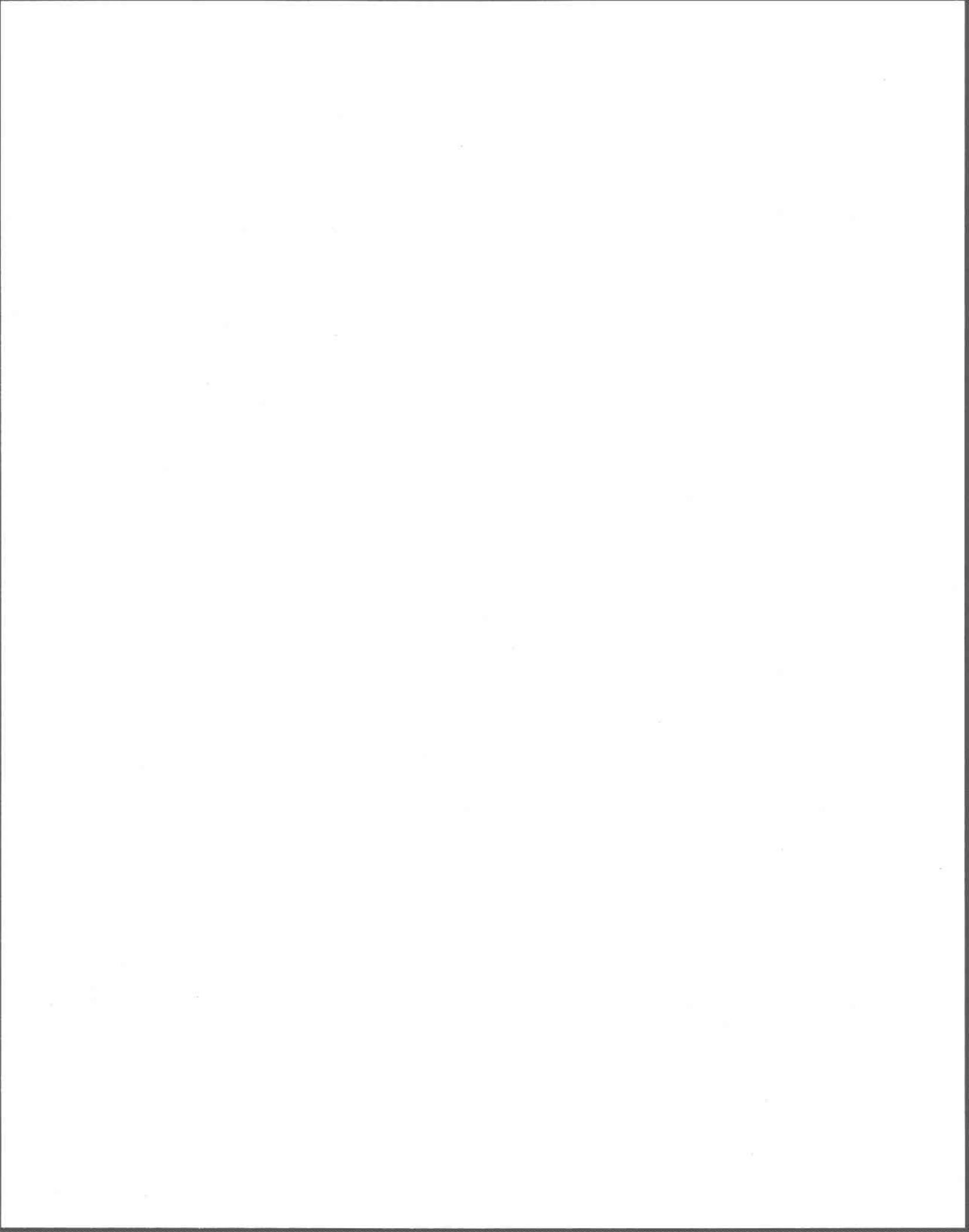
Les problèmes rencontrés lors de la structuration des données des quatre municipalités québécoises ont enrichi notre réflexion quant à la façon dont devraient être archivées les données sur les conduites et les bris, afin de permettre l'identification des facteurs qui ont une influence sur le taux de bris, et ainsi éclairer les gestionnaires dans leurs décisions sur les interventions. La réflexion entourant le choix d'une stratégie de modélisation et le développement d'une stratégie de calage adaptée aux municipalités possédant de courts historiques de bris sont les principaux aspects originaux de la thèse.

Étudiante :

Geneviève Pelletier

Directeur de recherche :

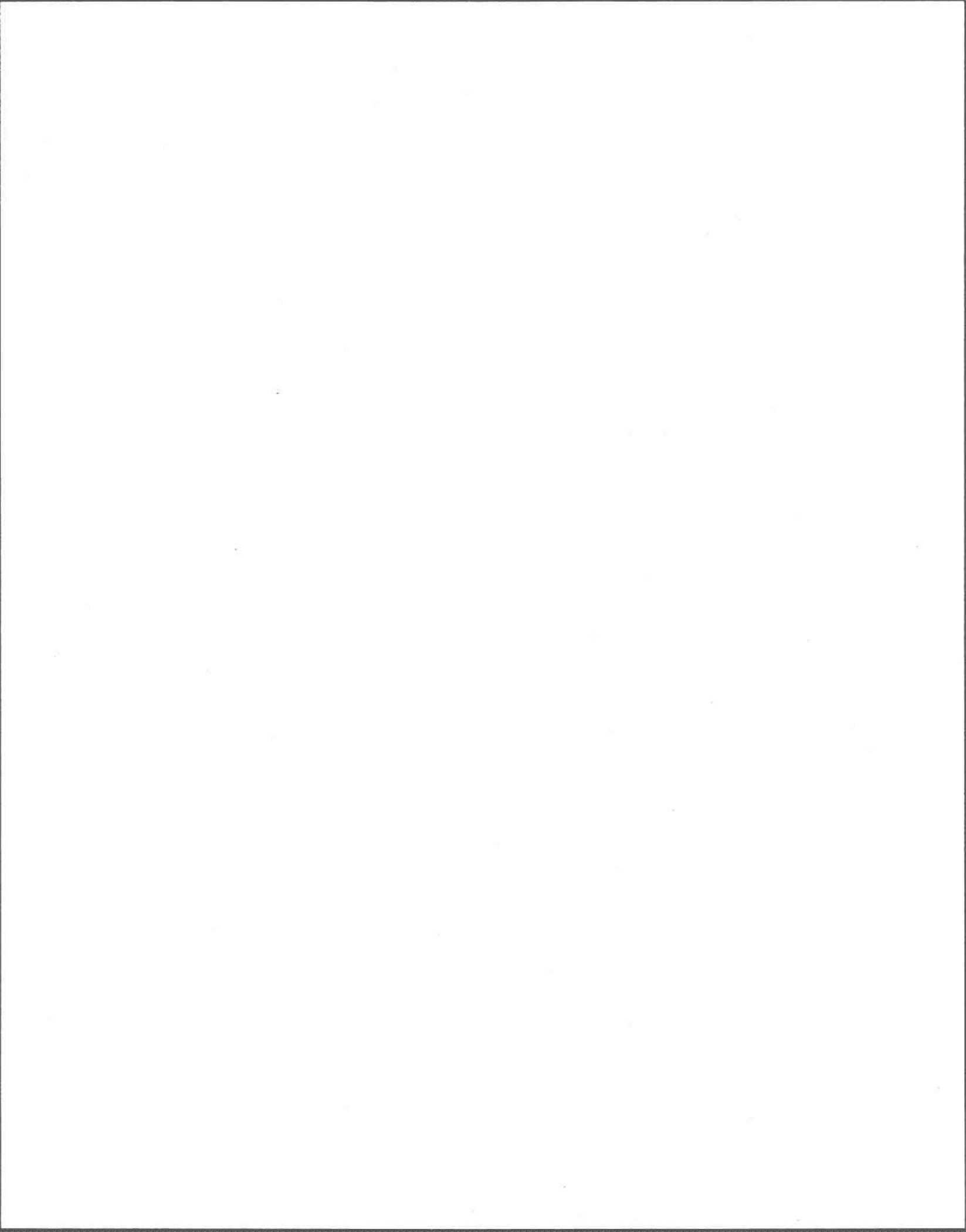
Prof. Jean-Pierre Villeneuve



ABSTRACT

Municipal water infrastructures seem to be in poor condition and deteriorating rapidly. Tools are needed to assess the present and future structural states of these infrastructures. A modelling strategy, inspired by survival analysis and using the annual number of recorded water pipe breaks (from repair records) as an indicator of the structural state of a network, was developed for municipalities with brief recorded pipe break histories. Pipe breakage behavior depends strongly on the number of previous breaks experienced by a pipe. To take this into account, pipe break data was divided into two strata (first breaks and subsequent breaks), modeled separately. The resulting simple three-parameter pipe break model requires minimal and readily available data.

Problems encountered while structuring the four Quebec municipalities' data have deepened our understanding of how data on pipes and breaks should be archived, in order to facilitate the identification of factors that have an impact on break rates. These risk factors can then be used to help managers in their decision making concerning interventions on their network. The choice of a modelling strategy and the development of a calibration strategy adapted to municipalities with brief recorded pipe break histories are the main original aspects of this thesis.



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en tout premier lieu mon directeur de recherche, le professeur Jean-Pierre Villeneuve, pour la qualité de l'encadrement et le soutien financier dont j'ai bénéficié pendant quatre ans, mais surtout pour ses encouragements et son inégalable sens de l'humour qui ont ensoleillé mes années de travail sous sa direction. J'aimerais aussi remercier Alain Mailhot avec qui j'ai partagé toutes mes idées (et emprunté plusieurs des siennes) sur une base quotidienne et dont j'admire la créativité et la rigueur dans la solution de problèmes. Je remercie également Jean-François Noël pour la programmation de la stratégie de calage et je remercie les gestionnaires des municipalités pour leur disponibilité, leur expertise et leur enthousiasme : Normand Bouchard de la ville de Chicoutimi, Réjean Munger et Michel Fédak de la ville de Jonquière, Michel Chevalier de la ville de Gatineau et Guy Bilodeau de la ville de St-Georges.

Enfin, à tous ceux qui ont partagé les hauts et les bas de mes études doctorales : mon mari Sylvain, mes parents, mes soeurs Julie et Emmanuelle, ma belle-famille, Sophie, ainsi que tous mes collègues de l'INRS-Eau, MERCI! Mes études ont été financées par une bourse doctorale FCAR et par le soutien de l'INRS et du Prof. J.-P. Villeneuve. Une partie de la recherche présentée a été financée par le Ministère des Affaires Municipales.

À ma fille, Pénélope.

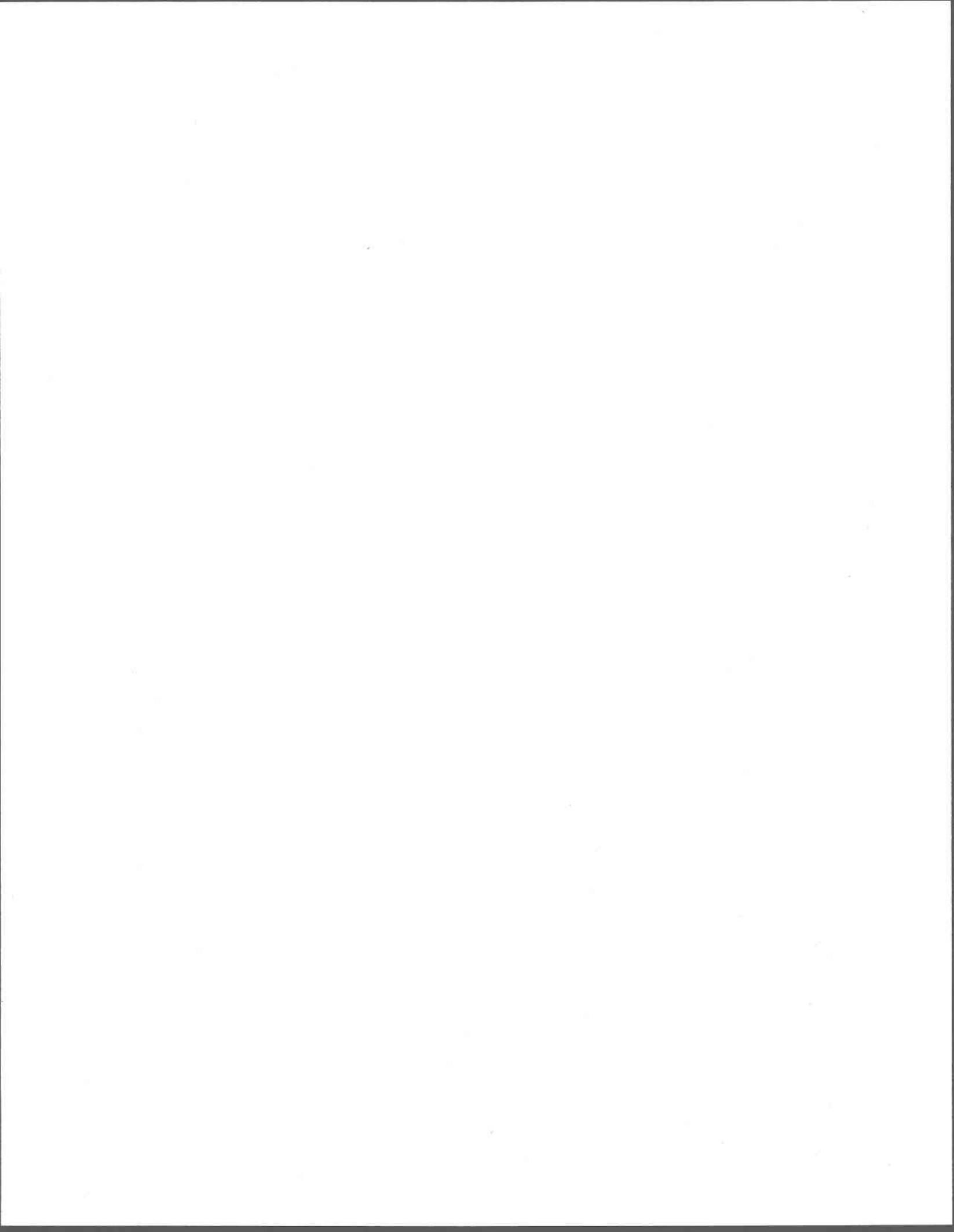


TABLE DES MATIÈRES

Résumé		iii
Abstract		v
Remerciements		vii
Liste des tableaux		xii
Liste des figures		xiii
1	INTRODUCTION	1
2	REVUE DE LITTÉRATURE	5
2.1	Bref historique de la problématique	5
2.2	La détérioration des conduites d'aqueduc en fonte grise et ductile	6
2.2.1	La corrosion	7
2.2.2	Les forces sur la conduite	8
2.2.3	Les facteurs de risque	9
2.3	Analyse physique	10
2.3.1	Étude de la ville de Vancouver (Doleac et al., 1980)	10
2.3.2	Étude du CERL (Kumar et al., 1984)	11
2.3.3	Étude du "Philadelphia Water Department" (1985)	11
2.4	Analyse descriptive	12
2.4.1	Ville de New York, N.Y.	12
2.4.2	Cincinnati, Ohio/New Haven, Connecticut	13
2.4.3	Boston, Massachusetts	16
2.4.4	Winnipeg, Manitoba	17
2.4.5	Banlieues de Paris et de Bordeaux et syndicats ruraux du Kronthal et du Kochersberg, France	19
2.5	Analyse prédictive	20
2.5.1	Les modèles de type agrégé	20
2.5.2	Les modèles de régression	21
2.5.3	Les modèles probabilistes	23
2.6	Modélisation avec court historique de bris	27
2.7	Stratégies de remplacement de conduites	30
2.8	Synthèse	33
3	STRUCTURATION DES DONNÉES ET PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES QUATRE CAS D'APPLICATION	39
3.1	Notions de base	40
3.1.1	Les tronçons	40
3.1.2	La stratification	41
3.1.3	Les historiques tronqués	42
3.1.4	Le remplacement	43
3.2	Structuration des tables AQUEDUC et BRIS	44

3.3	Présentation générale des quatre cas d'application	44
3.4	Éléments de réflexion sur la structuration des données	46
4	ANALYSE DESCRIPTIVE DES QUATRE CAS D'APPLICATION	49
4.1	Statistiques descriptives de base	49
4.2	Schémas-résumés	49
4.3	Analyse comparative	50
4.4	Synthèse	53
5	MODÉLISATION ET CALAGE	71
5.1	Stratégie de modélisation	72
5.1.1	Notions d'analyse de survie	72
5.1.2	Distributions Weibull et exponentielle	73
5.1.3	Fonction de vraisemblance	75
5.1.4	Modèle proposé	75
5.2	Stratégie de calage	77
5.2.1	Développement général de la méthodologie de calage	77
5.2.2	Illustration de la méthodologie de calage pour le modèle Weibull-exp.	80
5.3	Développement de l'expression du modèle	87
5.4	Synthèse	90
6	RÉSULTATS ET DISCUSSION	93
6.1	Résultats de calage	94
6.1.1	Municipalité A	95
6.1.2	Municipalité B	97
6.1.3	Municipalité C	98
6.1.4	Municipalité D	99
6.2	Résultats de modélisation	102
6.2.1	Municipalité A	102
6.2.2	Municipalité B	103
6.2.3	Municipalité C	103
6.2.4	Municipalité D	103
6.2.5	Impact de la durée de la période archivée sur les résultats de modélisation	104
6.3	Scénarios de remplacement	105
6.4	Analyse complémentaire réalisée	107
6.5	Synthèse	108
7	CONCLUSION	133
	Recommandation pour recherche future	136
APPENDICE A - STRUCTURATION DES TABLES AQUEDUC ET BRIS		
POUR LES QUATRE CAS D'APPLICATION		139
A.1	La table AQUEDUC	141
A.2	La table BRIS	142
A.3	Lien entre les deux tables	143
A.4	Municipalité A	145
A.5	Municipalité B	147
A.6	Municipalité C	147

A.7	Municipalité D	149
APPENDICE B - STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE BASE POUR		
LES QUATRE CAS D'APPLICATION		
B.1	Municipalité A	151
B.2	Municipalité B	153
B.3	Municipalité C	156
B.4	Municipalité D	158
APPENDICE C - ANALYSE COMPLÉMENTAIRE RÉALISÉE AVEC		
DIFFÉRENTS MODÈLES		
C.1	Résultats de calage obtenus pour différents modèles	221
C.2	Expressions de la fonction de vraisemblance	223
	C.2.1 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-E-E	227
	C.2.2 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-W-E	229
	C.2.3 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-W-E-E	230
LISTE DES RÉFÉRENCES		235

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Paramètres du modèle de Weibull	27
Tableau 3.3	Caractéristiques générales des quatre cas d'application	46
Tableau 5.1	Structure de la table des données d'entrée pour maximiser la fonction de vraisemblance	87
Tableau 6.1	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité A	96
Tableau 6.2	Valeurs des paramètres de calage par groupe de tronçons pour la période [1891-1996] pour la municipalité A	97
Tableau 6.3	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité B	97
Tableau 6.4	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité C	98
Tableau 6.5	Valeurs des paramètres de calage par groupe de tronçons pour la période [1945-1996] pour la municipalité C	99
Tableau 6.6	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité D	100
Tableau 6.7	Valeurs des paramètres de calage pour les quatre municipalités	100
Tableau 6.8	Augmentation du nombre annuel de bris dans 20 ans, exprimée en pourcentage du nombre de bris en 1996, pour trois scénarios de remplacement	106
Tableau 6.9	Taux de remplacement nécessaire afin de maintenir le nombre annuel de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996	107
Tableau 6.10	Liste et caractéristiques des modèles considérés pour la municipalité A	108
Tableau A.1	Exemple de la structure de la table AQUEDUC	142
Tableau A.2	Exemple de la structure de la table BRIS	143
Tableau C.1	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-E avec les données de la municipalité A	224
Tableau C.2	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-E-E avec les données de la municipalité A	224
Tableau C.3	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-W-E avec les données de la municipalité A	225
Tableau C.4	Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-W-E-E avec les données de la municipalité A	225
Tableau C.5	Intervalle de confiance à 95% sur le paramètre p_2 du modèle W-W-E par périodes d'installation avec les données de la municipalité A	226

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1	Facteurs influençant la fragilisation d'une conduite (adapté de O'Day et al., 1986) .	8
Figure 2.2	Diagramme des forces agissant sur une conduite (adapté de Moruzzi, 1984)	9
Figure 3.1	Notion de tronçons	41
Figure 3.2	Exemple de la notion de stratification pour un tronçon donné	42
Figure 3.3	Exemple de la notion d'historique tronqué pour un tronçon donné	43
Figure 3.4	Exemple de la notion de remplacement pour un tronçon donné	44
Figure 4.1	Schéma-résumé pour la municipalité A	57
Figure 4.2	Schéma-résumé pour la municipalité B	59
Figure 4.3	Schéma-résumé pour la municipalité C (sans les données de bris de l'année 1996)	61
Figure 4.4	Schéma-résumé pour la municipalité D	63
Figure 4.5	Pourcentages de tronçons dans différentes catégories de diamètres pour les quatre municipalités	65
Figure 4.6	Pourcentages du nombre total de bris dans différentes catégories de diamètres pour les quatre municipalités	65
Figure 4.7	Pourcentages de tronçons pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités	67
Figure 4.8	Pourcentages du nombre total de bris pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités	67
Figure 4.9	Pourcentages de tronçons pour différents types de matériau dans les quatre municipalités	69
Figure 4.10	Pourcentages du nombre total de bris pour différents types de matériau dans les quatre municipalités	69
Figure 5.1	Définition des variables reliées au temps	78
Figure 6.1	Fonctions de survie de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour différentes périodes d'installation pour la municipalité A	111
Figure 6.2	Fonctions de survie de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application	111
Figure 6.3	Fonctions de densité de probabilité de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application	113
Figure 6.4	Fonctions de risque de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application	113
Figure 6.5	Résultats de modélisation avec un seul jeu et avec deux jeux de paramètres de calage et nombres annuels de bris observés pour la municipalité A	115
Figure 6.6	Résultats de modélisation pour les deux groupes de tronçons et pour le modèle combinant les deux et nombres annuels de bris observés pour la municipalité A	115
Figure 6.7	Résultats de modélisation et nombres annuels de bris observés pour la municipalité B	117
Figure 6.8	Résultats de modélisation avec un seul jeu et avec deux jeux de paramètres de calage et nombres annuels de bris observés pour la municipalité C	119
Figure 6.9	Résultats de modélisation pour les deux groupes de tronçons et pour le modèle combinant les deux et nombres annuels de bris observés pour la municipalité C	119
Figure 6.10	Résultats de modélisation et nombres annuels de bris observés pour la municipalité D	121

Figure 6.11	Résultats de modélisation avec des paramètres de calage obtenus à partir de différentes périodes d'archivage de bris et nombre annuels de bris observés pour la municipalité C	123
Figure 6.12	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal aléatoire pour la municipalité A	125
Figure 6.13	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal prioritaire pour la municipalité A	125
Figure 6.14	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal aléatoire pour la municipalité B	127
Figure 6.15	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal aléatoire pour la municipalité C	129
Figure 6.16	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal prioritaire pour la municipalité C	129
Figure 6.17	Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement optimal aléatoire pour la municipalité D	131
Figure B.1	Croissance de la municipalité A en terme de tronçons	163
Figure B.2	Historique de bris pour la municipalité A	163
Figure B.3	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité A	165
Figure B.4	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité A	165
Figure B.5	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité A	167
Figure B.6	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité A	167
Figure B.7	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité A	169
Figure B.8	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité A	171
Figure B.9	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité A	171
Figure B.10	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité A	173
Figure B.11	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité A	173
Figure B.12	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité A	175
Figure B.13	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité A	175
Figure B.14	Nombre et pourcentage de tronçons par type de rue pour la municipalité A	177
Figure B.15	Taux de bris par type de rue pour la municipalité A	177
Figure B.16	Croissance de la municipalité B en terme de tronçons	179
Figure B.17	Historique de bris pour la municipalité B	179
Figure B.18	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité B	181
Figure B.19	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité B	181
Figure B.20	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité B	183
Figure B.21	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité B	183

Figure B.22	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité B	185
Figure B.23	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité B	185
Figure B.24	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité B	187
Figure B.25	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité B	187
Figure B.26	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité B	189
Figure B.27	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité B	189
Figure B.28	Croissance de la municipalité C en terme de tronçons	191
Figure B.29	Historique de bris pour la municipalité C	191
Figure B.30	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité C	193
Figure B.31	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité C	193
Figure B.32	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité C	195
Figure B.33	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité C	195
Figure B.34	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité C	197
Figure B.35	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité C	199
Figure B.36	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité C	199
Figure B.37	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité C	201
Figure B.38	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité C	201
Figure B.39	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité C	203
Figure B.40	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité C	203
Figure B.41	Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité C	205
Figure B.42	Taux de bris par type de sol pour la municipalité C	205
Figure B.43	Croissance de la municipalité D en terme de tronçons	207
Figure B.44	Historique de bris pour la municipalité D	207
Figure B.45	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité D	209
Figure B.46	Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité D	209
Figure B.47	Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité D	211
Figure B.48	Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité D	211
Figure B.49	Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité D	213
Figure B.50	Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité D	213
Figure B.51	Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité D	215
Figure B.52	Taux de bris par type de matériau pour la municipalité D	215

Figure B.53	Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité D	217
Figure B.54	Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité D	217
Figure B.55	Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité D	219
Figure B.56	Taux de bris par type de sol pour la municipalité D	219

1 INTRODUCTION

Que ce soit les routes, trottoirs, immeubles publics, ponts, aqueducs, égouts ou autres, les infrastructures urbaines sont en mauvais état et semblent se détériorer de plus en plus rapidement. Généralement, les gestionnaires municipaux attribuent cette détérioration rapide au manque de moyens financiers consentis dans des programmes d'entretien préventif. Il est également possible que nous soyons parvenus à la fin de la vie utile de plusieurs infrastructures bâties au cours de la période d'urbanisation rapide qui a suivi la Seconde Guerre Mondiale et celle des années 1960. De nos jours, la gestion des infrastructures d'eaux se limite souvent aux situations de crise, lorsque, par exemple, des consommateurs mécontents se plaignent de la présence d'un torrent dans leur rue suite à un bris d'aqueduc, de l'inondation de leur sous-sol suite à un refoulement d'égout, ou même de l'affaissement de la chaussée suite au lessivage de la fondation. Les coûts qui s'ensuivent (dommages aux propriétés, poursuites judiciaires, interventions sur les réseaux) peuvent être énormes pour les municipalités qui font déjà face à des contraintes budgétaires sévères. Avec le vieillissement des infrastructures municipales qui devient plus apparent, les gestionnaires municipaux cherchent de nouveaux critères et outils leur permettant de prendre des décisions éclairées pour résoudre ces problèmes.

À cet effet, il est utile de développer des outils pour évaluer l'état présent et futur des conduites d'aqueduc à partir de données existantes ou faciles à obtenir. Un modèle opérationnel de prévision du nombre annuel de bris sur un réseau est un outil utile pour les gestionnaires dans la planification des réparations, de la réhabilitation et du remplacement de conduites d'aqueduc. Pour modéliser l'état structural du réseau d'aqueduc, nous devons choisir un indicateur permettant de quantifier cet état. Le plus communément utilisé est le nombre annuel moyen de bris sur le réseau. Dans cette étude, un bris d'aqueduc est défini comme une rupture de conduite entraînant une perte d'eau visible en surface et donc nécessitant une intervention immédiate sur le réseau. Bien sûr, la fuite peut atteindre la surface plusieurs mois après la rupture initiale et peut même ne jamais atteindre la surface s'il y a, par exemple, possibilité d'infiltration dans le réseau d'égout à proximité. Ainsi, le "nombre de bris" dans cette étude représente plutôt un nombre d'interventions sur le réseau, puisque les bris non réparés ou non signalés n'apparaissent pas dans les données des municipalités. Les bris de conduites d'aqueduc répertoriés ne sont donc pas un indicateur parfait de l'état structural du réseau mais sont, sans aucun doute, un symptôme de sa détérioration. Sachant que peu de municipalités peuvent se permettre d'inspecter toutes les conduites de

leur réseau, le nombre annuel moyen de bris répertoriés est la donnée actuellement disponible la mieux corrélée à l'état structural du réseau.

La plus grande difficulté dans le développement de modèles opérationnels pour ce type de problème est le manque de données sur les réseaux d'aqueduc et sur les bris de conduites. Pour une analyse descriptive des bris, nous devons avoir accès à de l'information sur les caractéristiques physiques et environnementales des conduites ayant un impact sur le taux de bris, c'est à dire sur les facteurs de risque. La revue de littérature présente quelques cas d'application pour lesquels les principaux facteurs de risque spécifiques aux réseaux étudiés ont été identifiés. Il est rare qu'une municipalité possède les données nécessaires dans un format utilisable par un modèle mathématique, à moins qu'elle n'ait déjà participé à une telle étude. Bien que la plupart des municipalités possèdent de l'information sur les caractéristiques physiques de leurs conduites telles le diamètre, la longueur ou l'année d'installation, seules quelques unes d'entre elles archivent systématiquement les interventions sur les bris de conduites depuis plus d'une décennie. Pour qu'un modèle soit opérationnel dans un grand nombre de municipalités, il doit être conçu en s'adaptant au fait que la plupart des municipalités ne possèdent que de courts historiques de bris, c'est-à-dire des historiques de bris qui ne couvrent que la période récente et non pas la totalité de l'historique du réseau depuis l'installation des premières conduites.

Un sondage auprès de 200 municipalités du Québec nous a permis d'identifier quelques municipalités qui possèdent une base de données de leur réseau d'aqueduc et où l'on retrouve un recensement des bris de conduites (Fougères et al., 1998). Quatre cas d'application seront présentés dans le cadre de cette thèse. De ces quatre cas d'application, le plus long historique de bris disponible est de 21 ans, ce qui est très court considérant que l'historique du réseau d'aqueduc remonte à 1891. Les trois autres cas d'application présentent des historiques de bris de 16, 10 et 7 ans, pour des historiques de réseaux remontant à 1945, 1948 et 1911, respectivement. Les seules conduites pour lesquelles l'historique de bris est entièrement connu sont celles posées depuis le début de l'archivage systématique des bris. Leur nombre est restreint, ce qui affecte la qualité des analyses statistiques qui peuvent être effectuées sur la base de ces seules conduites. De plus, puisque ces conduites ont été installées récemment, elles ne peuvent fournir d'information sur l'état structural des conduites plus vieilles.

La modélisation de type statistique est actuellement l'approche la plus couramment utilisée et dans ce

cadre, l'analyse de survie est la méthodologie la plus appropriée. En effet, l'analyse de survie est une technique statistique permettant de modéliser les temps de survie, qui a été développée d'abord pour les besoins de la recherche biomédicale. Des chercheurs ont adapté cette technique à la problématique des ruptures de conduites (Andreou et al., 1987a, Clark et al., 1982, Clark et al., 1988). L'analyse de survie permet d'intégrer l'information liée au fait que certaines conduites brisent alors que d'autres ne briseront pas dans un intervalle de temps déterminé. Les conduites peuvent briser plusieurs fois, et à chaque bris, une intervention sur le réseau est nécessaire. Plusieurs chercheurs ont observé que la probabilité de bris dépend fortement du nombre antérieur de bris sur la conduite, et il s'agit, en fait, du facteur le plus important pour prédire les bris. En effet, plus la conduite a brisé, plus elle brisera. Les gestionnaires des réseaux d'aqueduc avec qui nous avons collaboré ont aussi observé que lorsqu'il y a un bris sur une conduite, très fréquemment il y en aura un deuxième et même un troisième à proximité (en dedans de quelques mètres), et ce, dans les quelques jours après l'intervention. Ceci peut être dû en partie par le stress causé par la réparation, mais surtout par le fait que la conduite est en mauvais état sur toute sa longueur (Goulter et Kazemi, 1988). Pour que les résultats obtenus par l'analyse de survie soient représentatifs du comportement en terme de bris de tout le réseau, il faut que l'archivage des bris couvre une bonne portion de cet historique. L'analyse de survie "classique" ne peut être utilisée que pour les conduites dont l'historique complet est connu. Ces conduites sont peu nombreuses lorsque les historiques de bris sont très courts comme c'est le cas pour la problématique abordée dans cette thèse.

Les deux principaux buts de la recherche sont : (1) de développer un modèle opérationnel pour évaluer l'état structural présent et futur du réseau d'aqueduc de municipalités possédant de courts historiques de bris; et (2) d'estimer l'impact de différents scénarios de remplacement des conduites sur le nombre annuel de bris. Le choix d'une stratégie de modélisation a demandé une grande réflexion puisqu'elle devait être conçue pour utiliser des données existantes ou faciles à obtenir et pour prendre en compte le fait que le nombre de bris antérieurs sur une conduite est un facteur déterminant pour prédire les taux de bris. Les problèmes rencontrés lors de la structuration des données des quatre cas d'application nous ont permis de réfléchir sur la façon dont devraient être archivées les données sur les conduites et les bris, afin de permettre l'identification des facteurs qui ont une influence sur le taux de bris. L'originalité de la thèse vient principalement du développement d'une stratégie de calage formellement exacte, qui prend explicitement en compte le fait que nous ne savons pas combien, ni quand ont eu lieu les bris pendant la période non-archivée. La stratégie de calage développée permet donc d'étendre le domaine d'application

de l'analyse de survie aux municipalités à courts historiques de bris.

Le modèle a aussi été conçu pour permettre d'évaluer l'impact de différentes stratégies de remplacement des conduites sur le taux de bris. En effet, le remplacement d'une conduite a l'effet le plus durable sur la vie utile du réseau en rétablissant l'intégrité structurale d'une portion du réseau, mais au coût le plus élevé. La réhabilitation d'une conduite est moins coûteuse que le remplacement mais son effet sur la vie utile du réseau est mal documenté et très variable dépendant de la méthode utilisée (chemisage, tubage, revêtement intérieur, etc.). La réhabilitation a l'avantage de restaurer en partie l'intégrité structurale de la conduite à moindre coût. La réparation (habituellement la pose d'un manchon) est actuellement la méthode de choix et c'est la moins coûteuse à court terme. Un modèle opérationnel basé sur le concept que lorsqu'il y a bris, il y a réparation, mais permettant aussi d'estimer l'impact du remplacement de conduites, même dans des municipalités à courts historiques de bris, peut servir d'outil de diagnostic (e. g. identification des conduites à risque), mais surtout, lorsque couplé avec un modèle économique, il devient un outil puissant d'aide à la décision lors de la planification des interventions (Kleiner et al., 1998a).

Les chapitres de la thèse sont les suivants : revue de la littérature, structuration des données, analyse descriptive, modélisation et calage, résultats et discussion et conclusion. À la suite du texte, on retrouve trois appendices conçus pour alléger le texte principal : A - Structuration des tables AQUEDUC et BRIS pour les quatre cas d'application, B - Statistiques descriptives de base pour les quatre cas d'application, et C - Équations des modèles. Finalement, on retrouve la liste des références. Les tableaux et les figures sont incorporées au texte, sauf les figures des Chapitres 4 et 6 qui sont regroupées en fin de chapitre, et celles de l'Appendice B, où elles sont nombreuses et regroupées en fin d'appendice.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

La revue de la littérature avait pour but de faire le point sur les travaux réalisés autour de la problématique de la détérioration de l'état structural des réseaux d'aqueduc, d'identifier les causes principales de cette détérioration et de choisir un indicateur fiable de l'état structural pour la modélisation. De plus, il était important de mettre en lumière les facteurs ayant une influence sur le taux de bris (les facteurs de risque) afin d'identifier les données à recueillir dans les municipalités québécoises, tant pour l'analyse descriptive que pour l'analyse prédictive. À cet effet, un tour d'horizon exhaustif des études de cas dans la littérature a permis d'identifier non seulement les facteurs de risque propres à chaque étude, mais aussi de profiter des conclusions tirées suite aux analyses des données et aux différents efforts de modélisation. La revue de littérature avait donc également pour but de mettre en lumière différentes stratégies de modélisation afin d'éclairer notre choix pour les municipalités à court historique de bris. En fait, bien que plusieurs types de modèles aient été répertoriés, seules deux études (Eisenbeis, 1994; Kleiner et Rajani, 1999), à notre connaissance, s'intéressaient spécifiquement à la problématique des courts historiques de bris. Puisqu'un des buts de la recherche était d'évaluer l'impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre annuel de bris, nous avons également fait un survol des études touchant au problème d'optimisation des interventions sur un réseau.

2.1 Bref historique de la problématique

C'est en 1986 que 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 et ce, pour toutes les infrastructures urbaines (Siddiqui et Mirza, 1996). Cet intérêt pour l'état des infrastructures urbaines d'eaux nous vient en partie des États-Unis où deux événements ont éveillé les consciences : le passage du "Safe Drinking Water Act" de 1974, qui a mandaté le USEPA (U. S. Environmental Protection Agency) de contrôler l'apport et la qualité de l'eau potable et la publication du rapport "America in Ruins" de Choate et Walter (1981), qui a soulevé le débat quant à l'existence d'une crise des infrastructures. Suite à ce constat, O'Day et al. (1986) ont préparé un rapport détaillé, financé par la fondation de recherche de l'AWWA (American

Water Works Association) et le USEPA, sur l'évaluation des conduites d'aqueduc dans le but de planifier les interventions de réhabilitation/remplacement. Ce rapport avait pour but d'identifier les facteurs qui ont un impact sur la détérioration des conduites d'aqueduc et de proposer des méthodes pour aider les gestionnaires d'infrastructures d'eaux dans l'évaluation de l'état structural présent et futur de leur réseau. Tel que mentionné dans le rapport d'O'Day et al. (1986), les efforts de recherche portent sur l'un ou l'autre des trois secteurs suivants : l'analyse physique, descriptive ou prédictive. La revue de littérature dresse un portrait de l'état d'avancement de la recherche dans ces trois secteurs aux Sections 2.3 à 2.5.

2.2 La détérioration des conduites d'aqueduc en fonte grise et ductile

La détérioration des conduites d'aqueduc en fonte grise et ductile résulte principalement de l'effet de la corrosion interne et/ou externe sur les parois des conduites. Les autres causes de bris sont le gel et les surcharges en surface. Plusieurs conditions aggravantes entrent en ligne de compte, tels les sols agressifs, l'utilisation de sels de déglacage, les imperfections des matériaux, les défauts attribuables aux techniques de construction 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 ou à un matériau déficient 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 fragilisation de la condition structurale d'une conduite.

Les fuites et 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 fuites et 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 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 la rouille et 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 peut éventuellement affecter la capacité de lutte contre les incendies en plus d'augmenter la probabilité de prolifération bactérienne. La détérioration de la qualité de l'eau est attribuable autant à la présence de rouille et de produits 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 dans les gestionnaires de réseau diminue.

2.2.1 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. La corrosivité dépend des propriétés physiques et chimiques de l'eau et de la nature du matériau avec laquelle elle entre en contact. Le taux de corrosion dépend d'actions physiques (*e.g.* l'érosion attribuable à des vitesses d'écoulement trop élevées) et chimiques (*e.g.* l'oxydation) entre le matériau de la conduite et l'eau. La croissance d'organismes sur les parois d'une conduite favorise la corrosion en créant un site favorable à une intensification des réactions physiques et chimiques (Schock, 1990).

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 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).

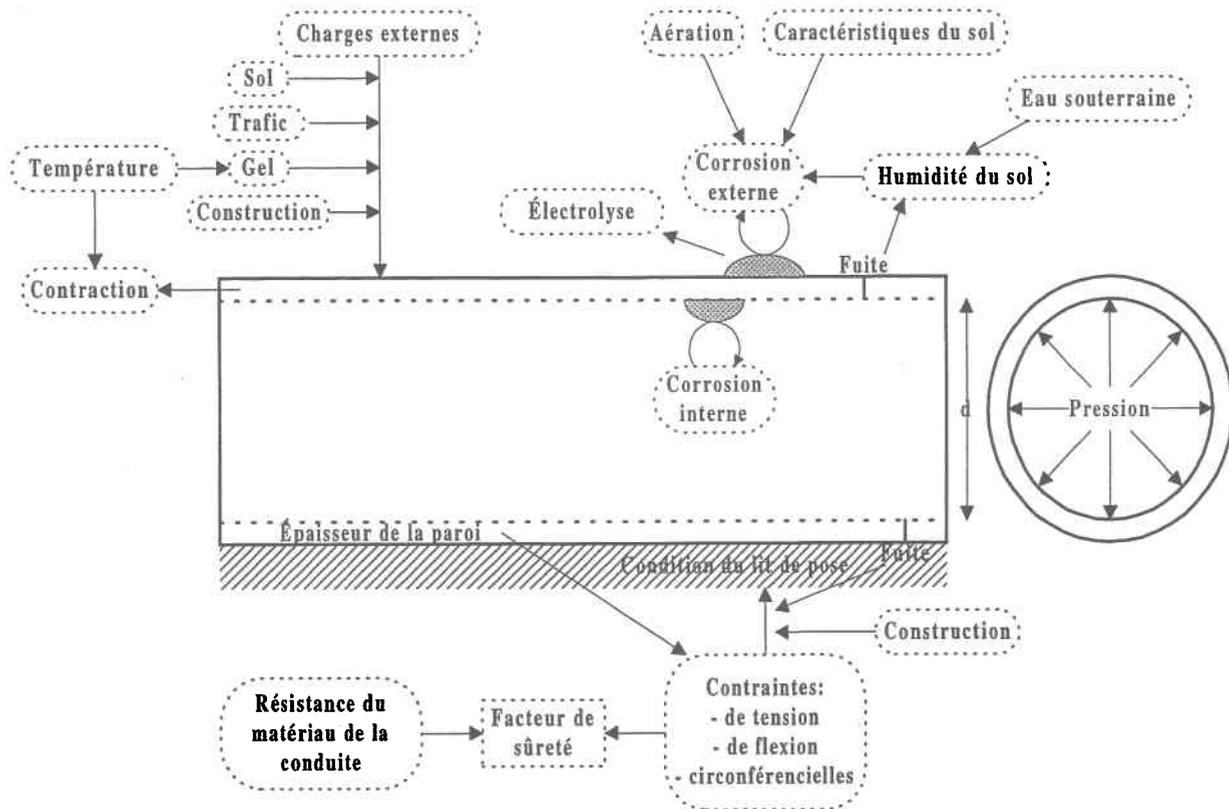


Figure 2.1 Facteurs influençant la fragilisation d'une conduite (adapté de O'Day et al., 1986)

2.2.2 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 viennent modifier ces forces : un mouvement violent du sol (M_f , M_t , T , A , C , P_e), un mouvement lent du sol (M_f , T , A), une transmission directe excessive de charges extérieures (M_f , T , P_e), des températures peu élevées (P_i , A), des coups de bélier (P_e , P_i , A) et des travaux de voirie (M_f , M_t , T , A , P_e) (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 circonférentiels 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).

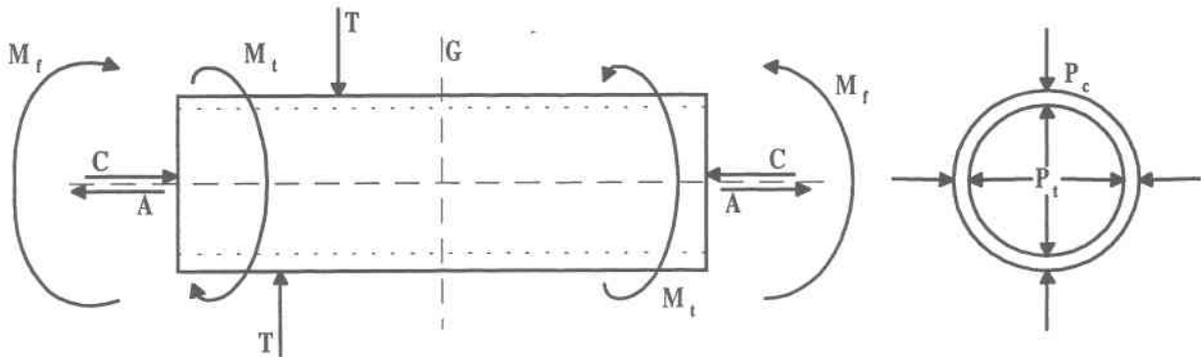


Figure 2.2 Diagramme des forces agissant sur une conduite (adapté de Moruzzi, 1984)

2.2.3 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. 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, l'occupation du sol, l'utilisation de sels de déglçage et le gel. 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 difficiles à intégrer à un modèle.

En fait, la plupart des facteurs de risque sont des facteurs artificiels, c'est-à-dire qu'ils englobent plusieurs propriétés difficiles, voire même impossibles, à prendre en compte individuellement comme facteurs de risque. Par exemple, le type de matériau est un facteur artificiel 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 artificielle qui permettra de mettre en lumière une relation avec le taux de bris. Plusieurs autres facteurs (artificiels 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 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.

2.3 Analyse physique

L'analyse physique consiste en 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 du matériau 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. (1986) : (1) une étude de la ville de Vancouver; (2) une du "U. S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory" (CERL); et (3) une de la ville de Philadelphie. Il est à noter que plusieurs projets de recherche dans ce domaine sont en cours à l'Institut de Recherche en Construction du CNRC (Conseil National de Recherche du Canada).

2.3.1 Étude de la ville de Vancouver (Doleac et al., 1980)

En 1978, la ville de Vancouver a développé un modèle pour estimer la durée de vie 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 déterminée 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 obtenu à la suite d'essais en laboratoire ou *in situ*. Les piqûres de corrosion réelles étaient approximativement 9 % moins profondes que celles estimées par le modèle.

2.3.2 Étude du CERL (Kumar et al., 1984)

Le CERL a développé un modèle d'estimation de la profondeur de la piqûre de corrosion externe et du temps au bris des conduites de gaz en fonte grise. Le modèle consiste en l'estimation d'un indice de corrosion (*CSI*, "Corrosion Status Index") qui caractérise l'état structural d'une conduite. Cet indice est présenté à l'Équation 2.1. L'indice de corrosion est égal à 100 pour une nouvelle conduite et à 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.* lorsque 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 piqûre de corrosion; et
T est l'épaisseur de la paroi de la conduite.

Selon les auteurs, cette approche pourrait être appliquée aux conduites d'aqueduc moyennant quelques modifications afin de 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). Afin d'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 piqûre de corrosion dans le temps; la prédiction de la profondeur maximale à partir de la profondeur moyenne de la piqûre 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 du sol. Les données sur les profondeurs des piqûres de corrosion, sur l'historique des fuites et sur plusieurs caractéristiques du sol sont obtenues grâce à des essais à long terme en laboratoire ou *in situ*.

2.3.3 Étude du "Philadelphia Water Department" (1985)

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 tenant compte respectivement : des caractéristiques des conduites, des conditions environnementales, des pertes d'eau dues à la corrosion, de l'estimation des charges, des charges maximales, des charges de conception, des facteurs de sûreté, et de la cote d'état structural. Le modèle estime les charges internes et externes et les pertes dues aux corrosions internes et externes. 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.

2.4 Analyse descriptive

L'analyse descriptive consiste à calculer des statistiques descriptives pour illustrer les patrons et les tendances des taux de bris. Ce type d'analyse ne peut être effectué que pour des municipalités possédant des bases de données exhaustives sur les caractéristiques de leur réseau d'aqueduc et sur les bris de conduites. Plusieurs problèmes sont souvent rencontrés lors de la création de bases de données, tels : les données manquantes ou conflictuelles, le manque de personnel et de ressources, de l'information non-informatisée (archives sur papier), etc. Pour ces raisons, on observe dans la littérature que les données de certaines grandes villes sont souvent reprises par plusieurs chercheurs qui les analysent sous différents angles. Plusieurs publications intéressantes touchent à différents aspects des bases de données, telles celles de O'Day (1982), Clark et Goodrich (1989) et Habibian (1992).

2.4.1 Ville de New York, N.Y.

O'Day et al. (1980) ont présenté les résultats obtenus suite à l'analyse des causes des bris de conduites dans la ville de New York. Dès les années 70, la ville de New York avait plus de 6 000 miles (9 600 km) de conduites et le nombre de bris annuel était 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 km. 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; 150, 200 et 250 mm) 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% de toutes les 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 (300 mm), bien qu'elles ne soient pas considérées comme petits diamètres, 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 (remblai emporté par l'eau).
- ⇒ Le lieu d'occurrence du bris est le facteur le plus important pour prédire les bris dans un secteur.
- ⇒ Le stress que subissent les conduites au 20^{ième} siècle est de beaucoup supérieur au stress qu'elles devaient subir au 19^{ième} siècle, compte tenu des charges de surface.

2.4.2 Cincinnati, Ohio/New Haven, Connecticut

Des analyses de type régression effectuées à partir des données de la ville de Cincinnati ont permis d'identifier les facteurs de risque ayant une influence significative sur le taux de bris par km. 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 d'analyse de survie présentés dans Clark et al. (1982) et décrits à la Section 2.5.2.

Goodrich (1986) a étudié la possibilité de préparer et d'analyser les données d'une fraction représentative (10%; *i.e.* 397 miles de réseau; 635 km) du réseau d'aqueduc de la ville de Cincinnati au lieu de consacrer des ressources pour la ville au complet. Le personnel de la ville a choisi 10% de l'aire totale de la ville sur des cartes papier représentant, à leur avis, un échantillon valable du réseau d'aqueduc. Les données ont été rassemblées pour toutes les conduites de la zone sélectionnée 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 subi un bris.

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 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 efforts 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 l'analyse de survie, et plus précisément le modèle des risques proportionnels de Cox (pour une description détaillée de ce modèle, voir Kalbfleisch et Prentice, 1980), pour modéliser les probabilités d'occurrence de bris dans deux villes américaines non-identifiées, simplement désignées par A et B (mais identifiées ultérieurement comme Cincinnati et New Haven).

Deux comportements typiques ont pu être identifiés à partir des données : un représentant les bris peu fréquents et l'autre, les bris fréquents. Les bris peu 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. Parmi les facteurs significatifs pour la modélisation du premier stade de détérioration, ceux ayant la plus forte influence sur l'augmentation du taux de bris dans le temps sont : une grande pression interne, un fort pourcentage de conduite en zone très développée (*i.e.* une forte charge en surface), le nombre de bris précédents et le temps entre le premier et deuxième bris.

Karaa et Marks (1990) ont utilisé le modèle de Cox pour analyser le réseau de la ville de New Haven qui comprenait 1 428 conduites ayant des diamètres de 6 à 48 pouces (150 mm à 1 200 mm) au temps de cette étude. Les données de la ville ont été divisées en six strates correspondant à six périodes d'installation. Les variables identifiées comme facteurs de risque sont : le diamètre (6 à 48 pouces; 150 mm à 1 200 m), la longueur (100 à 14 000 pieds; 30 m à 4 200 m), 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 des temps au premier et au deuxième bris a une forme en "U".
- ⇒ 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 d'une conduite. Les bris ont plutôt tendance à apparaître à des endroits précis.

2.4.3 Boston, Massachusetts

Pour faire face au défi grandissant que pose 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 revêtement intérieur des conduites (Sullivan, 1982). La ville s'était fixée l'objectif de réhabilitation suivant : nettoyer et revêtir ou remplacer toutes les 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 (22.5 bris par 1000 km), à comparer à 75 pour New York (47 bris par 1000 km), 156 pour Denver (97.5 bris par 1000 km) et 1290 pour Houston (806 bris par 1000 km). De 1976 à 1980, 58% des interventions ont eu lieu sur des entrées de service, ce qui représentait 72.7% du volume d'eau perdu, alors que 34% des interventions ont eu lieu sur les bornes-fontaines (3.6% du volume) et 7% sur des conduites (23.6% du volume). Le dernier 1% des fuites a eu lieu sur d'autres équipements et représentait 0.1% du volume d'eau perdu. 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 ont 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 non-localisées 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 problème 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 linéaire total de la ville) 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 futurs problèmes d'accessibilité et ceux dus à un changement d'occupation du sol (Sullivan, 1982).

Quatre études importantes ont été entreprises 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 connus la ville dans les années 80. La seconde étude portait sur les dommages causés par les courants vagabonds dans des zones près du métro mais aussi dans les zones préalablement desservies par des tramways. Des résultats préliminaires de cette étude ont démontré qu'une majorité de bris se produisent dans un rayon de 500 pieds (150 m) d'une ligne de métro ou d'une ligne abandonnée de tramway. La troisième étude s'intéressait à l'analyse historique des bris en fonction 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 visant à la sélection du revêtement intérieur ou du remplacement des conduites. Dans le cadre de cette 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 débit non-comptabilisé 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.

2.4.4 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 amiante-ciment en fonction du diamètre et de 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 plus grande des parois 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 aux 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 situés en deçà d'un mètre les uns des autres et 46%, en deçà de 20 mètres les uns des autres. De plus, 42% des bris se produiront en deçà de 1 mètre d'un bris précédent et auront lieu la même journée. Les auteurs ne spécifient pas la nature des bris qui ont lieu durant la même journée, mais ces bris pourraient être dus, par exemple, à un manchon qui céderait lors de la remise sous pression suite à une réparation mal effectuée. 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 telle distribution. Ils ont obtenu un bon accord entre les résultats de modélisation et les données observées lorsque que le nombre moyen de bris subséquents observés pour une année donnée, dans un intervalle temporel de 2 jours et spatial de 3 mètres, 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 a été faite à partir des logarithmes de la longueur et de l'âge des conduites, comme variables indépendantes, 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 (Système d'Information Géographique).

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, comme variables indépendantes, la longueur et l'âge des conduites. Un coefficient de détermination d'environ 0.95 a été obtenu pour trois catégories de conduites aux 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.

2.4.5 Banlieues de Paris et de Bordeaux et réseaux 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 réseaux d'eau du Kronthal et du Kochersberg (Bas-Rhin), pour un total de 700 km de conduites. Pour les deux grands réseaux urbains, ce chercheur avait accès à 40 ans (LED-Bordeaux) et 54 ans (CEB) de données de bris. Dans le cas des réseaux ruraux, les données étaient disponibles sur 17 ans. La durée de ces historiques de bris est assez longue pour permettre que l'analyse de survie donne des résultats intéressants. En particulier, Eisenbeis (1994) a utilisé le modèle

des risques proportionnels de Cox. Les facteurs de risque significatifs pris en compte par le modèle sont : la longueur et le diamètre des conduites, le sol (variable artificielle égale à 1 pour un sol corrosif et 0 sinon), le facteur "trafic-chaussée" (variable artificielle égale à 1 pour une conduite posée sous la chaussée dans une rue à trafic élevé et 0 pour une conduite posée sous le trottoir ou dans une rue à faible trafic), le facteur "nature cana" (variable artificielle égale à 1 pour une conduite posée après 1966 et 0 sinon; 1966 est l'année d'introduction de la fonte ductile et de nouveaux types de joints) et le facteur "Ap75" (variable artificielle égale à 1 pour une conduite posée après 1975 et 0 sinon; 1975 est l'année d'introduction des manchons en polyéthylène sur la CEB). Une diminution de la valeur des facteurs diamètre, nature cana et Ap75 entraîne une hausse dans le risque de bris pour les réseaux LED-Bordeaux et CEB. Ainsi, les petits diamètres, les conduites en fonte grise et les conduites n'ayant pas été réparées avec des manchons en polyéthylène brisent plus souvent.

2.5 Analyse prédictive

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 en relation avec des variables explicatives. 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 O'Day et al. (1986) : les modèles de type agrégé, de régression et probabiliste. Ces trois types de modèles ont fait l'objet d'une revue critique par Elnaboulsi et Alexandre (1996) et sont présentés brièvement dans les sections qui suivent.

2.5.1 Les modèles de type agrégé

Les modèles de ce type présentés dans la littérature sont de **nature statistique** et 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 (présentée à l'Équation 2.2) et une linéaire (à l'Équation 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; et
 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 de l'ordre de 5 % à 15 % par année, 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. Par contre, ce type de modèles ne tient aucunement compte de l'occurrence de bris précédents, qui est considéré comme le facteur le plus important pour prédire l'occurrence future des bris.

2.5.2 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 au USEPA 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.

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

- 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; et
 RES est le pourcentage de linéaire en zone résidentielle;

Il est à noter que les pourcentages de linéaire en zones industrielle et résidentielle sont des facteurs artificiels pour la charge en surface et la densité de trafic.

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

- où REP est le nombre de bris;
 PRD est la pression différentielle (en livres/pouces²);
 A est le 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., 1986) 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 ont 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 ($R^2 = 0.37$). 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.

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

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. 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 très faibles ($R^2 < 0.5$).

2.5.3 Les modèles probabilistes

Les modèles probabilistes les plus souvent cités dans la littérature sont basés sur l'analyse de survie. L'analyse de survie est une technique statistique de modélisation des temps de survie. L'avantage majeur de l'analyse de survie est qu'elle tient compte de l'absence autant que de l'occurrence des bris, contrairement aux modèles agrégés et de régression. Les désavantages majeurs sont qu'elle nécessite une caractérisation détaillée du réseau d'aqueduc et un grand échantillon de conduites pour lesquelles les bris sont connus depuis l'installation. Parmi les modèles basés sur l'analyse de survie, le modèle des risques proportionnels de Cox est le plus souvent cité. Le modèle de Cox est défini par une fonction de risque de base dépendant du temps multipliée par un facteur de stress qui dépend de différents facteurs de risque (variables caractérisant la conduite et son environnement dont l'influence doit être déterminée par régression), tel que présenté à l'Équation 2.7. En fait, le modèle de Cox est un cas particulier du modèle des risques proportionnels ("Proportional Hazards Model") pour lequel la fonction de risque de base est estimée directement à partir des données. Le modèle des risques proportionnels peut aussi être utilisé en

faisant une hypothèse sur le type de distribution pour la fonction de risque de base (e.g. distributions de Weibull et exponentielle).

$$\lambda(t; z) = \lambda_0(t) e^{z\beta} \quad (2.7)$$

où $\lambda(t; z)$ est la fonction de risque dépendant du temps t et des variables z ;
 $\lambda_0(t)$ est une fonction de risque de base, arbitraire;
 z est un vecteur de variables explicatives; et
 β est un vecteur de coefficients de calage associés aux variables z et pouvant être obtenus par maximum de vraisemblance.

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 ont subi un deuxième). Les problèmes sont donc concentrés sur un certain pourcentage de conduites. L'étude des probabilités de bris a permis de faire ressortir deux tendances : (1) le temps entre la pose et le premier bris est habituellement assez long; et (2) 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 2.4 et 2.5 sont deux exemples.

Dans le cadre de 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'avaient 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 remblai, 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 pouces (200 mm) installées durant la période de croissance 1944-1953.

L'analyse des données sur l'historique des bris de conduites d'aqueduc faite par Andreou et al. (1987a)

dans deux municipalités du Nord-Est des États-Unis (Cincinnati et New Haven) 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.

Ces chercheurs ont modélisé le premier stade (bris non-fréquents) par le modèle de risques proportionnels de Cox. Les facteurs de risque choisis sont de trois types : (1) l'historique des bris et d'entretien des conduites; (2) les propriétés intrinsèques des conduites; et (3) les propriétés extrinsèques associées à l'environnement des conduites. Quelques exemples typiques de facteurs de risque utilisés sont : la longueur des conduites, la pression, le diamètre, le matériau, la période d'installation, la corrosivité du sol et l'occupation du sol.

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, κ , doit être estimé par régression. Andreou (1985) a proposé une équation exponentielle dépendante des vecteurs z et β . Seulement un faible pourcentage des conduites entre dans ce stade, ce qui a un impact négatif sur l'estimation des paramètres.

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

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

Eisenbeis (1994) a 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 réseaux ruraux du Bas-Rhin, en France. L'analyse de survie a été faite à l'aide du modèle des risques proportionnels 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. L'auteur a observé des comportements différents pour l'occurrence des premiers bris et 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. Les deux premières strates sont modélisées par une distribution de Weibull alors que la dernière est modélisée par une exponentielle (cas particulier du modèle de Weibull lorsque $p=1$) puisque 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 de régression du modèle des risques proportionnels sont les mêmes pour toutes les strates.

L'auteur note que les variables 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 de régression 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 modéliser $\lambda_o(t)$. Ainsi, les paramètres κ et p doivent être obtenus pour chacun des réseaux puis peuvent être utilisés dans le modèle des risques proportionnels avec les coefficients de régression obtenus précédemment. Le Tableau 2.1 présente les paramètres κ et p du modèle de Weibull. L'historique des bris sur les réseaux 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. Cela suggère que la deuxième strate pourrait être représentée par une distribution exponentielle et vraisemblablement regroupée avec la troisième strate.

Herz (1996) a utilisé un modèle de survie "en cohortes" de type de conduites pour estimer les taux annuels de bris et les taux de renouvellement pour 10 réseaux européens. Le modèle de survie en cohortes pour les conduites d'aqueduc est un modèle qui utilise des taux de bris et de renouvellement différents par classe d'âge et de matériau afin d'estimer les longueurs à réhabiliter par type de conduites, année

après année. Ce chercheur a développé sa propre distribution pour modéliser les temps de survie (distribution de Herz), afin de reproduire plus adéquatement la réalité observée sur les réseaux européens qu'il a étudiés. Cette approche a permis de prédire des taux annuels de renouvellement entre 0.3% et 2% pour un scénario jugé optimiste (détérioration des conduites moins sévère qu'attendue) et entre 1.2% et 5% pour un scénario jugé pessimiste.

Tableau 2.1 Paramètres du modèle de Weibull

Strates	Paramètres	Réseaux d'aqueduc		
		LED-Bordeaux	CEB	Bas-Rhin
Premier bris	κ	0.03	0.02	0.03
	p	1.67	1.21	1.27
2 ^{ième} au 4 ^{ième}	κ	0.15	0.10	0.07
	p	1.06	0.99	1.08
5 ^{ième} et plus (exponentielle)	κ	0.15	0.20	-
	p	1	1	-

2.6 Modélisation avec court historique de bris

D'après notre recherche bibliographique, les deux seuls modèles prédictifs développés pour des municipalités à court historique de bris sont présentés dans Eisenbeis (1994) et Kleiner et Rajani (1999). Alors qu'Eisenbeis (1994) a utilisé un modèle de Cox, Kleiner et Rajani (1999) ont plutôt utilisé un modèle agrégé tel que développé par Shamir et Howard (1979) et présenté à l'Équation 2.2. En effet, Kleiner et Rajani (1999) présentent une méthodologie pour estimer les coûts associés au remplacement de conduites lorsque confrontés avec une quantité limitée de données de plus souvent incomplètes. L'approche proposée est basée sur l'étude détaillée d'une région "Z" comprenant 298 km de conduites (2 430 tronçons) pour laquelle un historique de bris de 24 ans existe. L'identification des facteurs de risque et la méthode de calage du modèle agrégé pour la région "Z" sont ensuite transposées à une ville (2 038 km de conduites divisées en 16 383 tronçons), qui comprend neuf régions dont celle à l'étude. Ce sont les données de cette ville qui sont en quantité limitée (historique de bris de 4 ans) et incomplètes.

L'analyse des données exhaustives de la région "Z" a permis d'identifier neuf facteurs de risque : la période d'installation, le type de sol, le diamètre, la pression d'opération, la densité de circulation des automobiles, la densité de circulation des autobus, le type de chaussée, l'état de la chaussée et le type de fondation de la route. Une analyse de variance univariée de type ANOVA a permis de déterminer quels facteurs de risque permettent de discriminer les taux de bris par classe homogène. Les facteurs retenus suite à l'analyse de variance sont les suivants : la période d'installation, le type de sol, la pression d'opération et le type de chaussée. Une analyse de variance bivariée de type ANOVA a permis de mettre en lumière le fait que les données sur la pression d'opération et le type de chaussée sont regroupées en majorité dans une classe en particulier, et pour cette raison, leur influence sur les taux de bris pour différentes classes homogènes ne peut être établie. L'analyse a aussi fait ressortir le fait que pour la période d'installation 1950-1959, les taux de bris sont significativement différents pour les conduites de 150 mm par rapport aux autres diamètres. Les trois facteurs de risque retenus sont donc la période d'installation, le type de sol et le diamètre pour la période d'installation 1950-1959.

Le modèle de Shamir et Howard (1979) a été utilisé pour modéliser les taux de bris par classe homogène de facteurs de risque pour les données de la région "Z". Le calage du modèle a été fait en utilisant la méthode des moindres carrés avec poids sur les données des vingt premières années de l'historique. Aléatoirement, 40 % des données des années 1973 à 1979 et 1996 ont été enlevées afin de tenir compte du fait que la municipalité faisait alors de la détection de fuites. Les poids associés aux années 1973 à 1979 représentaient la moitié de ceux associés aux autres années afin de tenir compte de l'incertitude plus grande des données les plus anciennes. Les résultats obtenus lors de la validation sur les quatre dernières de l'historique sont très variés. En général, plus la longueur du linéaire pris en compte et le nombre total de bris sont élevés, plus les résultats sont bons. À l'opposé, le modèle sous-estime considérablement le nombre total de bris lorsque la longueur du linéaire et le nombre total de bris sont petits. Entre ces deux extrêmes, les résultats sont jugés satisfaisants. Les auteurs ont de plus comparé le nombre de bris cumulatif et le nombre de bris annuel prédits par le modèle pour les données regroupées et les données par classe homogène. Bien que le nombre de bris cumulatif soit semblable dans les deux cas, le nombre de bris annuel est mieux estimé par le modèle prenant en compte les classes de facteurs de risque (sous-estimation de 17 % par rapport aux données réelles) que pour le modèle avec données regroupées (sous-estimation de 23 %). Les résultats de l'étude détaillée sur la région "Z" ont ensuite été transposés pour prédire les taux de bris dans la ville au complet en normalisant par rapport aux longueurs de linéaire dans

chacune des classes. Les résultats varient énormément entre les classes, bien que le nombre total de bris prédit est proche du nombre total de bris réel pour chacune des 4 années de l'historique de la ville. Les courbes ainsi obtenues peuvent être utilisées pour prédire les nombres de bris futurs pour cette ville.

Dans Eisenbeis (1994), le problème est présenté pour une municipalité "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 la municipalité "A" à partir d'un modèle général bâti sur un plus long historique de bris. En effet, les travaux de modélisation avec le modèle de Cox sur les réseaux étudiés (LED-Bordeaux, CEB et Bas-Rhin) ont permis de constater que les facteurs de risque et les coefficients de régression sont similaires peu importe le réseau et que les spécificités locales sont plutôt associées à la fonction de risque de base, ce qui permet la création d'un modèle général. La première méthode pour créer un modèle particulier consiste à développer un modèle à partir des données de la municipalité "A" et du modèle général, en éliminant toutes les conduites de la municipalité "A" posées avant 1988 puisque leur historique de 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 de la municipalité "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 par ce chercheur. 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 la municipalité "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. 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. Lorsque le nombre de bris atteint une unité, alors l'année a est prise comme date d'occurrence du bris.

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.

2.7 Stratégies de remplacement de conduites

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 recommandent le remplacement d'un tronçon lorsque celui-ci a subi deux bris et plus par bloc depuis son installation (un bloc \approx 130 m). De plus, les gestionnaires ont décidé de remplacer graduellement les conduites de 6 pouces (150 mm) 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 remplacés 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 observés); 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 avec 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 les 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'intérêt ajusté et le facteur de coûts indirects. La principale conclusion de cette étude est qu'une politique de remplacement agressive (remplacement après deux ou trois bris) est économiquement justifiable lorsque le taux de bris sur le réseau est élevé alors que s'il est faible, la politique devrait être moins agressive.

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 varient 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 nomographes 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 définir 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 du 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 présentant un intérêt économique moindre.
- ⇒ Bien que deux stratégies peuvent engendrer les mêmes coûts, une stratégie de remplacement plus agressive (remplacement après peu de bris) générera un réseau plus fiable quoiqu'à un coût initial plus élevé.

Kleiner et al. (1998a) ont présenté une méthodologie de planification à long terme de la réhabilitation des systèmes de distribution d'eau. L'aspect économique et la capacité hydraulique du réseau sont analysés simultanément durant la période de prédiction, tout en prenant en compte la détérioration de l'intégrité structurale et de la capacité hydraulique de chaque conduite. Dans cette étude, la détérioration de l'intégrité structurale des conduites est modélisée par le modèle de type agrégé de Shamir et Howard (1979). L'équation de Sharp et Walski (1988) est utilisée pour modéliser l'impact du vieillissement sur la capacité hydraulique des conduites du réseau d'aqueduc. La méthodologie développée permet de choisir une méthode de réhabilitation appropriée pour chacune des conduites du réseau, que ce soit de faire du tubage, de remplacer la conduite avec une conduite de même diamètre, ou avec un plus grand diamètre, etc., et de planifier ces interventions, tout en maintenant une pression adéquate dans tout le réseau. La fonction de coût prend en compte une suite infinie de coûts répartis dans le temps qui sont associés avec des cycles infinis de réhabilitation pour chaque conduite.

Kleiner et al. (1998b) ont aussi présenté une méthodologie pour incorporer l'approche précédente à un système d'aide à la décision afin de faciliter l'identification de la stratégie de réhabilitation optimale et du temps optimal d'intervention pour chacune des conduites. La fonction objectif à minimiser comprend les coûts de réhabilitation et les coûts d'entretien pour l'horizon de prédiction et les contraintes principales sont la conservation de la masse et de l'énergie et une pression résiduelle minimale aux noeuds. Les résultats obtenus ont été validés pour de petits réseaux de distribution en comparant les coûts obtenus par cette approche avec les coûts calculés pour plusieurs stratégies de réhabilitation et pour un grand réseau de distribution en comparant les coûts obtenus avec ceux estimés par six gestionnaires de

réseaux.

2.8 Synthèse

Les corrosions interne et externe sont les causes principales de la détérioration de l'état structural des réseaux d'aqueduc en fonte grise et ductile. En fait, l'eau chargée de sels minéraux circulant dans des conduites de fonte ou de fonte ductile favorise la création d'une cellule électrochimique, ce qui se traduit par des sites d'oxydation et de dissolution du métal ainsi que des sites de tuberculisation. La corrosion en attaquant les parois des conduites les amincit jusqu'au point où la résistance du matériau est surpassée par les forces exercées sur la conduite et il y aura bris. Ainsi, le nombre de bris sur un réseau peut servir d'indicateur de son état structural.

Plusieurs facteurs ont une influence sur le nombre de bris. Pour certains, l'impact est quantifiable (e.g. plus de bris sur les petits diamètres) alors que pour d'autres, l'impact n'est que soupçonné (e.g. température de l'eau, voir Habibian, 1994). Pour étudier l'influence des facteurs de risque sur le taux de bris, il faut que les données soient disponibles pour la majorité des tronçons d'un réseau. Puisque les données récoltées dans les municipalités varient beaucoup et que plusieurs facteurs artificiels peuvent être associés à un même phénomène (e.g. l'impact de la corrosivité du sol peut être estimé par le pH du sol, par sa résistivité à saturation ou par le type de sol, etc.), le choix des facteurs de risque à inclure dans une stratégie de modélisation devant être applicable à plusieurs municipalités québécoises dépend surtout des données disponibles dans ces municipalités. Les facteurs de risque les plus souvent cités dans la littérature et disponibles (ou faciles à obtenir) dans les municipalités québécoises sont : l'âge, le matériau, le diamètre, la longueur, le type de sol et l'occupation du sol.

L'analyse physique des conduites en fonte grise a permis d'identifier les corrosions interne et externe comme principal facteur de fragilisation des conduites. Les études de Doleac et al. (1980) et de Kumar et al. (1984) ont établi des relations entre la profondeur des piqûres et le temps au bris (la deuxième étude portait sur les conduites de gaz). Ces relations ne peuvent être utilisées que lorsque ce type de données physiques sur la corrosion est disponible, ce qui n'est actuellement pas le cas au Québec.

L'analyse descriptive des données de réseaux d'aqueduc des villes de New York, Cincinnati, New Haven,

Boston, Winnipeg, des banlieues de Paris et de Bordeaux et du Kronthal et du Kochersberg permet de tirer certaines conclusions générales, qui serviront de points de comparaison lors de l'analyse des données de nos propres cas d'application :

- ⇒ l'âge des conduites n'est pas le seul facteur explicatif du taux de bris;
- ⇒ toutes proportions gardées, les conduites de petits diamètres Brisent plus souvent, probablement à cause de leurs parois plus minces;
Il est à noter toutefois que les bris rendent souvent les conduites de petits diamètres inopérantes alors que celles de grands diamètres peuvent être toujours opérationnelles même si elles présentent plusieurs fuites.
- ⇒ l'installation des conduites après 1960 (pour Cincinnati et New Haven, selon Clark et al., 1988) ou après 1940 (pour les mêmes villes, selon Karaa et Marks, 1990) et après 1966 (pour les banlieues de Paris et Bordeaux) est souvent citée comme facteur de risque, probablement à cause de changements de procédés manufacturiers et de techniques d'installation;
- ⇒ le lieu d'occurrence des bris et le nombre de bris antérieurs sur une conduite sont les facteurs les plus importants pour prédire les bris;
- ⇒ deux stades (ou plus) de détérioration sont souvent identifiés : les bris peu fréquents pour lesquels le taux de bris augmente dans le temps, et les bris fréquents pour lesquels le taux de bris est relativement constant; et
- ⇒ les conduites en fonte grise sont plus âgées et Brisent plus souvent.

L'analyse prédictive nécessite l'utilisation ou le développement d'une stratégie de modélisation. Trois types de modèles de nature statistique sont les plus souvent cités : les modèles de type agrégé, de régression et probabilistes. Les études de Shamir et Howard (1979) et Walski et Pelliccia (1982) sont deux exemples de modèles de type agrégé. Ce type de modèles repose sur l'hypothèse que le taux de bris pour des conduites de caractéristiques homogènes ne dépend que du temps. Les modèles de régression tentent de prédire le taux de bris en établissant des relations avec des facteurs de risque. Les études de Clark et al. (1982) et du "Des Moines Water Works" (O'Day et al., 1986) en sont deux exemples. Toutefois les coefficients de détermination obtenus dans les deux cas sont très faibles ($R^2 < 0.5$). Parmi les modèles probabilistes, l'analyse de survie est la technique la mieux adaptée à la problématique de modélisation de l'état structural des réseaux d'aqueduc puisqu'elle a été développée pour modéliser les temps de survie. L'analyse de survie possède un avantage majeur sur les autres types de modèles en ce

qu'elle prend en compte non seulement l'occurrence de bris mais aussi le fait que certaines conduites n'ont jamais brisé. La modélisation de différentes strates de données permet de prendre en compte l'observation faite par plusieurs chercheurs que le comportement en terme de bris dépend principalement du nombre de bris antérieurs.

Le modèle basé sur l'analyse de survie le plus souvent cité dans la littérature est le modèle de Cox, qui comprend aussi un aspect régression linéaire servant à estimer l'influence de facteurs de risque ayant un effet multiplicatif sur la fonction de risque. Le modèle de Cox est un cas particulier du modèle des risques proportionnels ("Proportional Hazards Model") pour lequel la fonction de risque de base est estimée directement à partir des données, plutôt qu'en faisant une hypothèse sur le type de distribution pour cette fonction (e.g. distributions de Weibull et exponentielle). L'analyse de survie en soi ne dépend pas de l'aspect régression mais de la distribution choisie pour modéliser les temps de survie et de la méthodologie d'estimation des paramètres des distributions. Dans le cadre de la problématique à l'étude, les temps de survie sont le nombre d'années entre l'installation de la conduite et son premier bris, puis entre les bris suivants. L'analyse de survie permet non seulement d'estimer la probabilité de bris sur un horizon de prédiction donné mais aussi d'estimer l'impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre de bris. Plusieurs chercheurs ont utilisé l'analyse de survie avec succès pour prédire les taux de bris dans des municipalités qui possédaient un historique de bris couvrant plusieurs décennies (Clark et al., 1982, 1988; Andreou et al., 1987a, 1989b; Eisenbeis, 1994).

Quant aux travaux faits à partir de courts historiques de bris, les deux seules études qui se sont penchées sur la question, à notre connaissance, sont celles de Kleiner et Rajani (1999) et d'Eisenbeis (1994). Dans ces deux cas, les chercheurs ont obtenus des valeurs de paramètres pour différentes classes de conduites à partir d'un modèle général (historique de bris de plusieurs décennies) et ont transposé ces paramètres aux différentes classes de conduites d'une municipalité en particulier qui possède un historique de bris beaucoup plus court. Le modèle général utilisé dans le cas de Kleiner et Rajani (1999) est un modèle agrégé de type Shamir et Howard (1979) alors qu'Eisenbeis (1994) utilise plutôt un modèle de Cox.

Eisenbeis (1994) a constaté que les facteurs de risque et les coefficients de régression étaient similaires peu importe le réseau et que les spécificités locales sont plutôt associées à la fonction de risque de base. 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 la municipalité à faible historique. Ainsi, ce chercheur a créé des dates probables d'occurrence de premier bris pour chaque classe de facteurs de risque, en évaluant le nombre probable de bris à chaque année depuis la date de pose. À partir de l'échantillon des premiers bris, on procède de la même manière pour les dates d'occurrence du deuxième bris, puis du troisième, et ainsi de suite. Lorsque l'échantillonnage est terminé, les bris "reconstitués" sont ajoutés aux bris réels et le modèle statistique peut être développé.

Notre choix de modélisation est fortement inspiré des travaux d'Eisenbeis (1994) :

- ➡ nous utilisons le nombre de bris comme indicateur de l'état structural d'un réseau d'aqueduc;
- ➡ nous utilisons l'analyse de survie comme technique mathématique pour modéliser les temps de survie;
- ➡ nous divisons les bris en strates selon leur ordre (2 strates dans notre étude, 3 dans celle d'Eisenbeis (1994));
- ➡ nous utilisons la distribution de Weibull pour le temps de survie entre la pose et le premier bris et une distribution exponentielle pour les bris subséquents;
- ➡ nous prenons en compte, dans le cas des municipalités A et C, un facteur de risque autre que le temps.

Contrairement à Eisenbeis (1994), nous n'avons pas accès à un historique de bris couvrant plusieurs décennies, donc il nous est impossible de développer un modèle général et d'utiliser un modèle de Cox. De plus, notre réflexion sur la problématique spécifique des courts historiques de bris nous a amenés à développer une approche formelle parfaitement adaptée aux municipalités à court historique de bris.

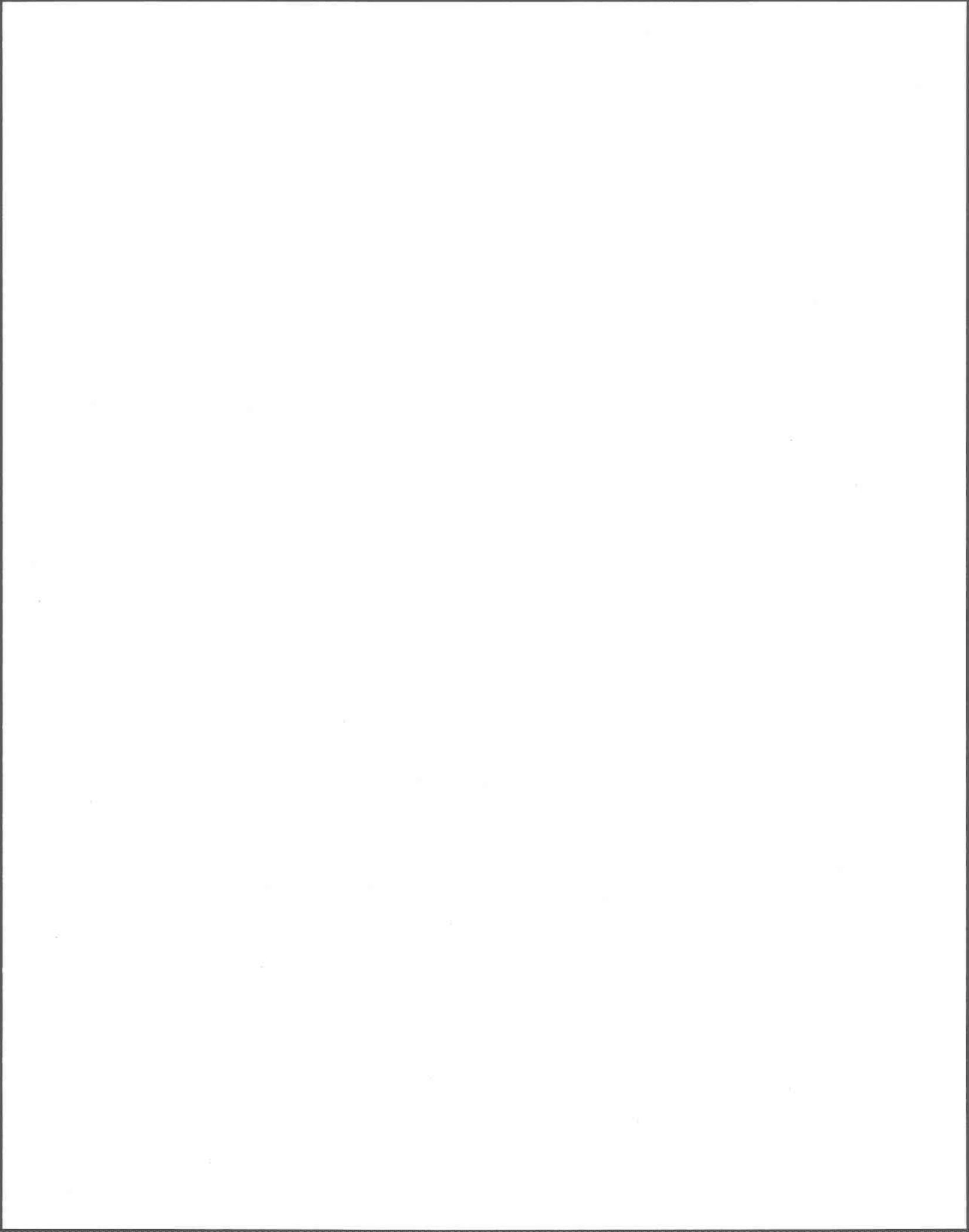
La section sur les stratégies de remplacement de conduites présente les travaux de Male et al. (1988, 1990) sur la politique de remplacement des conduites d'aqueduc de la ville de New York. Quelques conclusions tirées de ces études sont intéressantes par rapport aux travaux exposés dans cette thèse :

- ➡ 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.
- ➡ 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).

- ➡ 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 en se basant sur des facteurs indirects tels que la planification des travaux de voirie ou le besoin d'augmenter la capacité hydraulique.

Finally, the recent works of Kleiner et al. (1998a, 1998b) deserved to be mentioned since they present a methodology of long-term planning of the rehabilitation of distribution water systems, incorporated in a decision aid system to facilitate the identification of the optimal rehabilitation strategy and the optimal intervention time for each pipe. The methodology takes into account the deterioration of the structural integrity of pipes by the aggregated model of Shamir and Howard (1979). The decision aid system allows choosing a rehabilitation method appropriate for each pipe of the network, whether it is to relining, to replace the pipe with a pipe of the same diameter or of a larger diameter, etc., and to plan these interventions, while maintaining an adequate pressure throughout the network.

An operational model allowing to evaluate the present and future structural state of a water distribution network fits perfectly in the framework of such a decision aid system. In practice, a model designed to be applicable to several municipalities and especially taking into account the fact that the majority of municipalities do not systematically archive their pipe breakages, which since a few years ago constitutes an undeniable asset. The use of the Shamir and Howard (1979) model, which cannot deal with the case of historical pipe breakages, is without doubt one of the weak points of the methodology proposed by Kleiner et al. (1998a).



3 STRUCTURATION DES DONNÉES ET PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES QUATRE CAS D'APPLICATION

La revue de littérature nous a permis d'identifier plusieurs facteurs ayant une influence sur le taux de bris des conduites des réseaux d'aqueduc. Un sondage réalisé auprès de 200 municipalités québécoises a permis d'identifier les municipalités possédant une base de données de leur réseau d'aqueduc et un archivage des bris de leurs conduites remontant à plusieurs années (Fougères et al., 1998). Quatre municipalités connaissaient plus précisément certaines caractéristiques physiques et environnementales de leurs conduites identifiées comme facteurs de risque précédemment. Les six facteurs de risque souvent cités dans la littérature et qui étaient disponibles (ou faciles à obtenir) dans toutes les municipalités avec qui nous avons collaboré, étaient : l'âge, le matériau, le diamètre, la longueur, le type de sol et l'occupation du sol. Pratiquement aucune des municipalités ne possédait toute l'information nécessaire sous support informatique, alors un important travail a dû être effectué pour compléter les informations manquantes à partir d'autres sources de données telles les cartes papier, les connaissances des gestionnaires, etc.

Habituellement, les municipalités regroupent les informations sur les caractéristiques physiques et environnementales de leur réseau et celles sur les bris de conduites dans deux tables différentes (ici nommées "AQUEDUC" et "BRIS"). Ces deux tables composent la base de données nécessaire pour modéliser l'évolution du nombre annuel moyen de bris sur un réseau. Toutefois, chaque bris observé doit pouvoir être associé au tronçon sur lequel ce bris a lieu. Pour ce faire, il faut qu'il existe de l'information commune aux deux tables qui permette de les lier. Entrevue au départ sans grande difficulté, la structuration des données pour les quatre cas d'application s'est avérée fastidieuse et a nécessité une certaine ingéniosité pour associer le plus grand nombre de bris avec le tronçon d'aqueduc sur lequel ils avaient eu lieu.

La première section (3.1) présente quatre concepts utiles pour la structuration des tables AQUEDUC et BRIS. La notion de tronçon s'applique au découpage du réseau d'aqueduc afin d'associer un bris à une unité spatiale homogène. La notion de stratification s'applique au découpage de la ligne de vie d'un

tronçon en temps de survie entre les bris. La notion d'historique tronqué permet de présenter le concept de césure et de mieux présenter la problématique des courts historiques de bris et enfin la notion de remplacement permet de montrer comment ceux-ci doivent être notés dans les tables. La section 3.2 invite le lecteur à consulter l'Appendice A (Structuration des tables AQUEDUC et BRIS pour les quatre cas d'application) où sont présentés les défis rencontrés lors de la structuration des tables AQUEDUC et BRIS. La section 3.3 fait une présentation générale des quatre municipalités avec lesquelles nous avons collaboré. Enfin, la section 3.4 présente les conclusions tirées suite à cet exercice.

3.1 Concepts utiles pour la structuration des tables AQUEDUC et BRIS

3.1.1 Les tronçons

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 adjacentes 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 trouvent 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 (voir Figure 3.1). Un tronçon est généralement 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. Par exemple, le tronçon #1 de la Figure 3.1 serait localisé sous le boulevard Villeneuve, entre les rues Pelletier et Mailhot. Plusieurs exceptions à cette règle existent, par exemple : plusieurs rues croisant un tronçon sans en définir le début ou la fin; un changement de caractéristiques (ce qui n'a pas nécessairement lieu à une intersection); 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). Évidemment, il serait beaucoup plus intéressant de définir le réseau à l'aide de coordonnées x-y à l'intérieur d'un SIG. On disposerait alors d'une information géo-référencée, précise, qui pourrait être manipulée rapidement.

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 localisés avec suffisamment de précision.

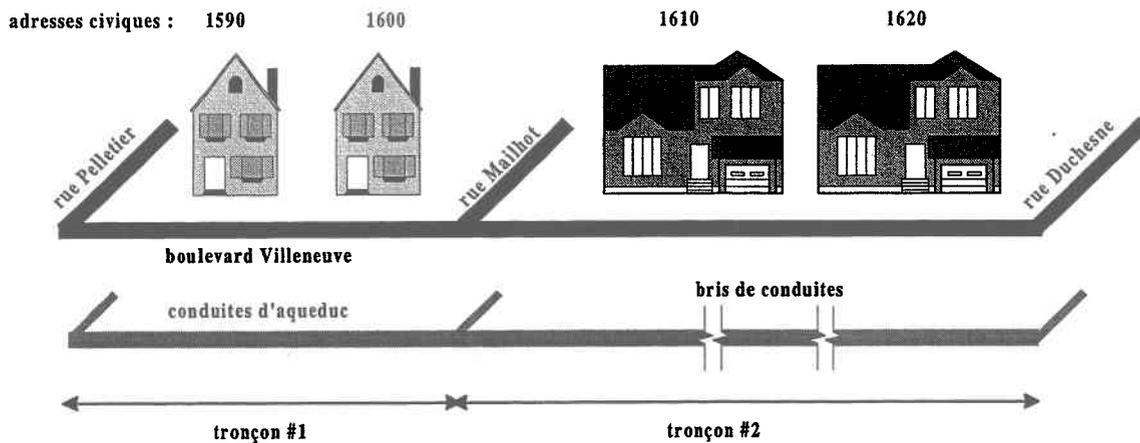


Figure 3.1 Notion de tronçons

3.1.2 La stratification

La stratification consiste à diviser la ligne de vie d'une conduite en intervalles de temps correspondant aux périodes entre les différents bris observés (*e.g.* temps entre l'installation et le premier bris, entre le premier et le deuxième, etc.). Pour ce faire, il faut connaître l'historique du tronçon depuis son année d'installation. La stratification est importante puisqu'à maintes reprises il a été noté dans la littérature que le temps de survie dépend de l'ordre du bris. Le concept de stratification est illustré à la Figure 3.2 pour un tronçon installé en 1950, qui subit son premier bris 20 ans plus tard, puis son deuxième, 15 ans après le premier et enfin son troisième, 5 ans après le deuxième. Au temps d'analyse, le quatrième bris n'a pas encore eu lieu, donc le temps de survie entre le troisième bris et l'année d'analyse est décrit en terme de "césure à droite" (pour plus de détails, voir Kalbfleisch et Prentice, 1980). La stratification permet de

regrouper les temps de survie selon l'ordre des bris, ce qui permet de les modéliser séparément.

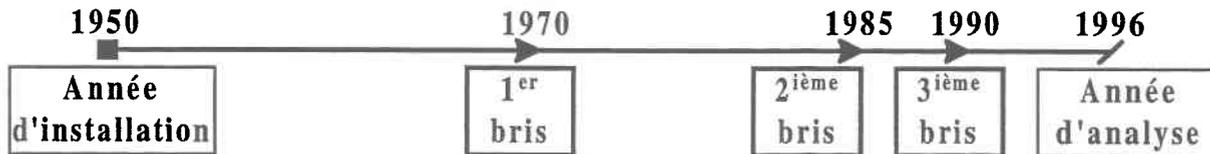


Figure 3.2 Exemple de stratification pour un tronçon donné

3.1.3 Les historiques tronqués

L'archivage systématique des bris couvre rarement tout l'historique d'une municipalité depuis la pose des premiers tronçons. Certaines municipalités possèdent d'excellentes archives sur papier mais la plupart d'entre elles n'ont commencé à archiver leurs bris sur support informatique que récemment. Des quatre cas d'application présentés, le plus long historique de bris sous support informatique est de 21 ans bien que les premiers tronçons dans cette municipalité aient été mis en terre dès 1891. Tel qu'illustré à la Figure 3.3, l'historique des bris est inconnu avant 1976, date du début de l'archivage des bris. Pour tous les tronçons installés avant le début de l'historique enregistré, l'ordre réel des bris observés est inconnu. Le premier bris enregistré n'est pas nécessairement un premier bris puisqu'aucun, un ou plusieurs bris peuvent avoir eu lieu pendant la période non-archivée. Donc, la stratification des bris nécessaire pour pouvoir appliquer l'analyse de survie "classique" n'est pas possible dans ce contexte. Par ailleurs, il est important de noter que le problème auquel nous faisons face dans le cas des courts historiques de bris se distingue d'un échantillon ayant subi une "césure à gauche" ("left-censoring") pour fin d'analyse (pour plus de détails, voir Miller, 1981). Le seul choix qui s'offre alors est de ne considérer que les tronçons pour lesquels nous connaissons l'historique des bris depuis leur pose. Ces tronçons sont généralement peu nombreux (surtout dans le cas des municipalités à faible historique de bris) et surtout, ils ne forment pas un échantillon représentatif du réseau puisque ce sont les tronçons les plus jeunes. Le modèle développé doit tenir compte de cette réalité.

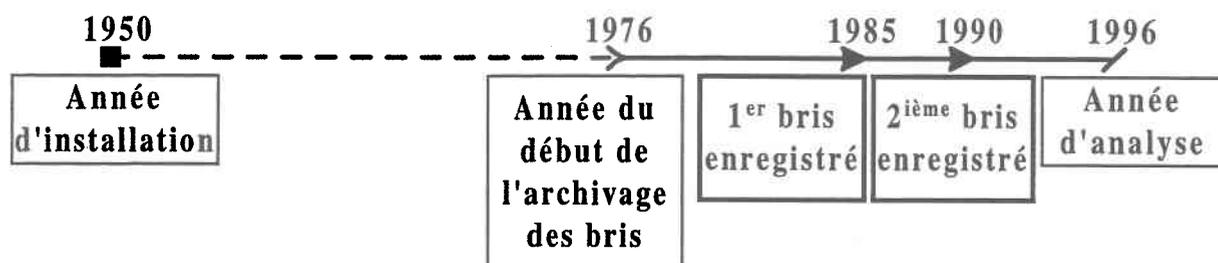


Figure 3.3 Exemple d'historique tronqué pour un tronçon donné

3.1.4 Le remplacement

Chaque bris répertorié nécessite une intervention sur le réseau, *i.e.* réparer, réhabiliter ou remplacer le tronçon. En général, la méthode de choix en période de restrictions budgétaires, comme c'est le cas depuis plusieurs années dans la plupart des municipalités québécoises, est de réparer la conduite en y posant un manchon puisqu'il s'agit de la méthode la moins coûteuse. Plusieurs firmes font la promotion de différentes méthodes de réhabilitation (tubage, chemisage, revêtement intérieur, etc.) auprès des gestionnaires en mettant en évidence le fait que la réhabilitation permet de restaurer une partie de l'intégrité structurale des conduites et d'ainsi allonger la vie utile des conduites par rapport à la pose de manchons. Puisqu'il est difficile d'évaluer l'impact des différentes méthodes de réhabilitation sur la durée de vie utile des conduites, nous avons plutôt choisi d'évaluer l'impact du remplacement des conduites à comparer à la réparation de conduites. Le gestionnaire de réseau qui choisit de remplacer un tronçon diminuera la fréquence de bris sur ce tronçon et ainsi "rajeunira" 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. Le temps de survie entre le deuxième bris et le remplacement du tronçon original subira une césure à droite afin d'indiquer que cette information est incomplète. Il est à noter que les remplacements ne sont pas nécessairement répertoriés depuis la même année que les bris. De plus, Fougères et al. (1998) ont mis en lumière le fait que les efforts de remplacement étaient presque inexistantes dans la plupart des municipalités québécoises jusqu'à tout récemment (dernière décennie) et qu'ils sont encore très limités.

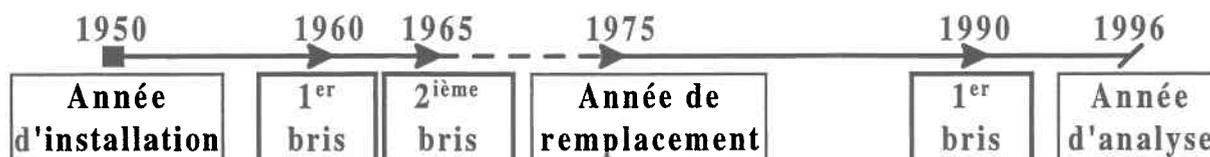


Figure 3.4 Exemple de remplacement pour un tronçon donné

3.2 Structuration des tables AQUEDUC et BRIS

Dans les municipalités québécoises avec lesquelles nous avons collaboré, des différences marquées existent quant à la définition donnée à un bris (certaines incluent les bris sur les joints, bornes-fontaines, etc.), 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 partie sous support informatique. Entrevue au départ sans grande difficulté, la structuration des données s'est avérée un véritable casse-tête dans chaque municipalité pour des raisons différentes. La description générale des tables AQUEDUC et BRIS, le défi de créer un lien entre ces deux tables, ainsi que la structuration des tables pour les quatre cas d'application sont présentés à l'Appendice A.

3.3 Présentation générale des quatre cas d'application

La disponibilité de l'information sur support informatique était un critère important pour la sélection des municipalités qui devaient participer à cette étude. Les municipalités devaient posséder l'information complète sur les six caractéristiques suivantes pour tous les tronçons de leur réseau d'aqueduc : le diamètre, la longueur, le type de matériau, l'année d'installation, le type de sol et l'occupation du sol. De plus, elles devaient posséder un historique de bris couvrant la plus grande proportion possible de l'historique complet du réseau. Un facteur déterminant a été la disponibilité de l'information permettant de lier les tables AQUEDUC et BRIS. En effet, pour plusieurs municipalités il n'existait aucun élément susceptible d'identifier le tronçon sur lequel avait eu lieu un bris donné. Puisque l'information nécessaire provenait souvent de différents départements municipaux (e.g. génie, environnement, travaux publics), nous avons constaté plusieurs incohérences entre les différentes sources d'information. La plupart des municipalités manquent de ressources pour uniformiser, vérifier, mettre à jour et compiler leurs données,

malgré la bonne volonté des gestionnaires.

Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques générales des quatre cas d'application. Les municipalités A et B sont similaires en terme de population et de longueur de réseau. La municipalité C est la plus grande, avec grossièrement une fois et demie la population des municipalités A et B et une fois et quart la longueur de leurs réseaux. La municipalité D est la plus petite, avec grossièrement un tiers de la population des municipalités A et B et une demie de la longueur de leurs réseaux. En général, une municipalité plus peuplée (C) a un ratio de longueur de réseau par habitant plus petit (4.4) et une municipalité moins peuplée (D), un ratio plus grand (7.8) : c'est ce qui est observé dans cette étude. Les municipalités A et B ont des réseaux plus âgés, leurs premières conduites ayant été posées au début du siècle, alors que les municipalités C et D ont posé leurs premières conduites à la fin des années 1940. La longueur moyenne des tronçons est très variable d'une municipalité à l'autre et dépend de la discrétisation du réseau faite dans chaque municipalité. La longueur moyenne dans la municipalité C est trois fois celle dans la municipalité D. La longueur moyenne des tronçons a sûrement un impact majeur sur les analyses puisque plus elle est grande, moins il y aura de premiers bris enregistrés sur le réseau, et plus il y aura de bris subséquents. L'impact de la longueur moyenne des tronçons sur les résultats n'a pas été évalué dans cette thèse mais devra être examiné dans le cadre de travaux futurs.

La municipalité A possède le plus long historique de bris et le plus haut taux de bris aux 100 km en 1996. Est-ce que cela signifie que cette municipalité a un réseau en plus mauvais état ou qu'elle procède à un archivage plus détaillé et complet de ses bris ? D'après le gestionnaire du réseau de cette municipalité, les deux raisons sont vraies. L'archivage des bris au cours des dernières années a été fait de façon plus consciencieuse et le réseau est vieux et n'a pas bénéficié de programme d'entretien préventif. Les municipalités B et C ont des taux de bris aux 100 km en 1996 similaires, alors que celui de D est le plus petit. Qu'est-ce que cela signifie ? D'après une étude réalisée au CNRC (Conseil National de la Recherche du Canada) par McDonald et al. (1994), basée sur la relation entre les taux de bris aux 100 km et la perception qu'ont les gestionnaires de réseau face à l'état global de leur réseau, un taux de 40 bris et plus par 100 km (comme pour la municipalité A) est considéré élevé et indique que le réseau est en mauvaise condition. Des taux entre 20 et 39 (comme pour les municipalités B et C) indiquent que le réseau est en condition acceptable, alors qu'un taux inférieur à 20 (comme pour la municipalité D) indique que le réseau est en bonne condition. En général, cela reflète bien la perception globale qu'ont

les quatre gestionnaires avec qui nous sommes entretenus pour cette étude, sauf dans le cas de la municipalité B, où le gestionnaire considérait son réseau en plus mauvais état. Il est à noter qu'un faible taux de bris dans une municipalité ne signifie pas que le volume d'eau perdu par des fuites non-localisées n'est pas important.

Tableau 3.1 Caractéristiques générales des quatre cas d'application

Caractéristiques	Municipalités			
	A	B	C	D
Population approximative	64 000	58 000	93 000	20 000
Longueur du réseau d'aqueduc (km)	352	305	407	155
Longueur de réseau (m) par habitant	5.5	5.3	4.4	7.8
Année de pose des premières conduites	1891	1911	1945	1949
Longueur moyenne d'un tronçon (m)	168	150	262	86
Nombre d'années d'archivage des bris	21	7	16	10
Nombre de bris aux 100 km en 1996	46	29	36	19

3.4 Éléments de réflexion sur la structuration des données

Bien que la structuration des tables des municipalités ait nécessité énormément de travail et de programmation informatique de la part de notre équipe de recherche et des gestionnaires de réseau, 75% des bris de la base de données ont pu être liés aux tronçons sur lesquels ils ont eu lieu dans la municipalité A, 83% dans la municipalité B, 85% dans la municipalité C et 94% dans la municipalité D. Il est important de noter que cet état de fait ne modifiera pas notre analyse en autant que l'échantillon de bris liés à un tronçon est statistiquement représentatif du comportement de l'ensemble du réseau en terme de bris. Malgré le fait que des incertitudes existent pour différentes caractéristiques dans chacune des municipalités, la qualité générale des informations contenues dans les tables est jugée satisfaisante. Par contre, il est clair qu'un problème d'incompatibilité entre l'information sur les réseaux d'aqueduc et l'archivage des bris existe et que les municipalités bénéficieraient grandement d'une utilisation d'outils

appropriés.

Une réflexion approfondie sur les données utiles à la gestion municipale des réseaux ainsi qu'une analyse des outils informatiques nécessaires à une bonne gestion des bases de données devraient être entreprises dans chaque municipalité. Certaines municipalités de taille moyenne (telles les municipalités A, B et C de la présente étude) bénéficieraient certainement de l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) pour la gestion de leurs données, bien que l'implantation d'un tel système demande certaines ressources (et surtout une volonté politique et un appui financier du conseil municipal).

En effet, l'utilisation d'un SIG peut grandement aider à une gestion optimale des données nécessaires à la modélisation des bris des conduites d'aqueduc et à leur visualisation (Scherer et Phebey, 1995). Le plan directeur du réseau d'aqueduc constitue la couche de base (carte informatisée) de l'information géographique. Chaque tronçon d'aqueduc est défini par un noeud initial et un noeud final localisés par des coordonnées (x, y, z). Aux éléments graphiques constituant le réseau d'aqueduc (e.g. ligne représentant un tronçon, symboles représentant un noeud, une station de pompage, etc.) peuvent se rattacher des bases de données contenant divers attributs (caractéristiques) tels un numéro de tronçon ou de noeud, les coordonnées (x, y, z) d'un noeud, le diamètre d'une conduite, le matériau, l'année d'installation, la longueur, le nombre et les caractéristiques des pompes, etc. À la couche du réseau d'aqueduc peuvent être superposées une couche du réseau de la voirie pour aider à la localisation et toute autre couche d'information utile à la ville (gaz naturel, électricité, égout sanitaire, égout pluvial, etc.). En plus des éléments de type ligne ou point, des polygones fermés peuvent servir à définir des zones dont les attributs peuvent être rattachés aux éléments contenus dans le polygone tels les types de sol, les zones de pression et les zones associées à différentes stations de pompage, etc.

Les attributs associés aux éléments et aux polygones peuvent être utilisés pour trier les données, pour quantifier des états ou pour calculer diverses statistiques. Par exemple, les fonctionnalités graphiques d'un SIG permettent, par exemple, de visualiser toutes les conduites de 200 mm de diamètre, de compter leur nombre ou de savoir quelle proportion du réseau est de 200 mm de diamètre. Une des grandes forces d'un SIG est de permettre de tester en conjonction avec d'autres modèles mathématiques divers scénarios hypothétiques tels l'ajout de nouvelles conduites, le changement de diamètre d'une conduite, la réhabilitation d'un tronçon, etc. (Pittman, 1994). La qualité des analyses dépend avant tout de la quantité

et de la qualité des données.

Souvent, les seules données disponibles sous format informatique sont celles servant à un modèle hydraulique. Les autres sources de données pouvant servir à alimenter un SIG sont multiples: les cartes papier à différentes échelles; les fiches de données papier; les autres données sous format informatique; les données de recensement et des services postaux; les relevés gouvernementaux; les photographies; les dessins AutoCAD^{MD}; etc. Un SIG opérationnel pour une grande municipalité peut facilement contenir 5 à 100 gigabytes d'information. Un des bénéfices les plus importants d'un SIG est de permettre la validation de l'information de base, ce qui permet d'identifier l'information incorrecte ou désuète, les erreurs, les omissions et les conflits (Scherer et Phebey, 1995).

4 ANALYSE DESCRIPTIVE DES QUATRE CAS D'APPLICATION

L'analyse descriptive consiste à calculer les statistiques de base sur les caractéristiques des conduites et les bris afin de faire ressortir les patrons et les tendances des taux de bris. Cela permet de mettre en lumière l'influence des six facteurs de risque pris en compte, soit le diamètre, la longueur, la période d'installation (facteur relié à l'âge de la conduite), le type de matériau, l'occupation du sol et le type de sol. L'analyse des données est une première étape nécessaire afin de concevoir une stratégie de modélisation adaptée à la quantité et la qualité des données disponibles.

4.1 Statistiques descriptives de base

Toujours afin d'alléger le texte principal de la thèse, les statistiques descriptives de base pour les quatre cas d'application ainsi que les figures qui y sont associées sont présentées à l'Appendice B. Les statistiques de base sur les caractéristiques des réseaux sont présentées par tronçon et par rapport au nombre total de tronçons formant le réseau en 1996. Le taux de bris est défini comme le rapport entre le nombre de bris observés durant la période d'observation (historique de bris à notre disposition) et le nombre de tronçons compris dans une catégorie. Par exemple, le taux de bris par type de matériau pour la municipalité A est 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 liés 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 au tronçon sur lequel il a eu lieu. Les bris qui n'ont pu être liés n'apparaissent donc pas dans ces analyses.

4.2 Schémas-résumés

La Figure 4.1 présente le schéma-résumé pour la municipalité A. Nous remarquons que la fonte grise fut le premier matériau à être utilisé. Ce matériau n'a pas été utilisé durant la période récente, au profit de la fonte ductile et du PVC. Il y a beaucoup plus de tronçons de petits diamètres (≤ 0.2 m) que de grands

diamètres (>0.2 m). Le plus grand nombre de tronçons a été posé durant 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 4.2 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 tronçons de grands diamètres étaient en Hyprescon^{MD}. 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'a pas été utilisée durant la période récente (1976-1996) alors que l'Hyprescon^{MD} l'est toujours pour certains tronçons de grands diamètres. Il y a toujours beaucoup plus de tronçons de petits diamètres que de grands diamètres. Le rythme de pose de tronçons a été relativement 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 4.3 présente le schéma-résumé pour la municipalité C. Nous remarquons que la fonte grise fut aussi le premier matériau à être utilisé. Ce matériau a été délaissé dans la période récente, au profit de la fonte ductile et du PVC. Il y a beaucoup plus de tronçons de petits diamètres (≤ 0.2 m) que de grands diamètres (>0.2 m). Le plus grand nombre de tronçons a été posé durant la période 1961-1975. La plus grande proportion de bris a lieu sur des tronçons installés durant cette même période.

La Figure 4.4 présente le schéma-résumé pour la municipalité D. La fonte grise fut le premier matériau à être utilisé. La fonte ductile est utilisée depuis la période 1961-1975. Le PVC n'a pas été utilisé dans la municipalité D au profit de l'amiante (1976-1996). La fonte grise a été utilisée durant la période récente (1976-1996). Il y a toujours plus de tronçons de petits diamètres mais avec une tendance durant 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 Analyse comparative

Les six prochaines figures présentent les pourcentages de tronçons et du nombre total de bris par catégories de diamètres, de périodes d'installation et de types de matériau pour les quatre municipalités.

Ces données sont présentées pour chacune des municipalités à l'Appendice B mais ces figures permettent de faire des comparaisons entre les municipalités. Lorsque le pourcentage du nombre total de bris est plus élevé que le pourcentage de tronçons dans une catégorie, cela signifie que cette catégorie présente un risque de bris élevé.

La Figure 4.5 présente le pourcentage de tronçons pour différentes catégories de diamètres dans les quatre municipalités à l'étude. Pour toutes les municipalités, la grande majorité des tronçons se retrouvent dans la catégorie 0.1 à 0.2 m. Les municipalités B, C et D ont des pourcentages similaires (70-75%) dans cette catégorie alors que la municipalité A a un pourcentage plus élevé (85%). La deuxième catégorie en importance dans toutes les municipalités est 0.2 à 0.3 m. Les pourcentages de tronçons sont encore similaires dans les municipalités B, C et D ($\approx 20\%$), alors que le pourcentage est plus bas ($\approx 10\%$) dans la municipalité A. Moins de 5% des tronçons de toutes les municipalités se retrouvent dans les quatre autres catégories de diamètres.

La Figure 4.6 présente le pourcentage du nombre total de bris pour différentes catégories de diamètres dans les quatre municipalités à l'étude. Le pourcentage du nombre total de bris est plus élevé que le pourcentage de tronçons pour les petits diamètres : seulement un peu plus élevé pour les diamètres inférieurs à 0.1 m, environ 10% plus élevé dans la catégorie 0.1 à 0.2 m dans les municipalités B, C et D et 4% dans la municipalité A. En effet, plusieurs chercheurs ont observé que les conduites de petits diamètres brisent plus souvent, probablement à cause de l'épaisseur des parois qui est moindre que pour les grands diamètres (Kettler et Goulter, 1985; Male et al., 1990). Pour les diamètres plus grands, le pourcentage du nombre total de bris est systématiquement plus bas que le pourcentage de tronçons.

La Figure 4.7 présente le pourcentage de tronçons pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités à l'étude. Les quatre périodes ont été définies par l'INRS-Urbanisation dans le cadre d'une étude concomitante (Fougères et al., 1998) et sont : avant 1945, 1945-1960, 1961-1975 et 1976-1996. Seules les municipalités A et B ont posé des tronçons avant 1945. La municipalité A a connu un ralentissement dans la pose de tronçons durant les deux dernières périodes comparativement à la période 1945-1960, alors que la municipalité B a posé un pourcentage similaire de tronçons durant les quatre périodes. La municipalité C a connu une pointe dans la pose de tronçons lors de la période 1961-1975, alors que la municipalité D a connu une augmentation progressive du pourcentage de tronçons posés

durant les quatre périodes. En général, la municipalité A a le réseau d'aqueduc le plus âgé et celui qui se développe le moins vite dans les dernières années alors que la municipalité D a le réseau le plus jeune et celui qui se développe le plus rapidement.

La Figure 4.8 présente le pourcentage du nombre total de bris pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités à l'étude. Il est important de noter que les comportements observés dans cette figure sont le reflet de la période archivée (les dernières années) et non de tout l'historique des réseaux. Pour la période "avant 1945", les pourcentages du nombre total de bris sont similaires aux pourcentages de tronçons dans les deux municipalités concernées. Pour la période 1945-1960, les municipalités B, C et D ont des pourcentages du nombre total de bris plus élevés que leurs pourcentages respectifs de tronçons, ce qui classe cette période d'installation comme période "à risque". Les tronçons de la municipalité A ne montrent pas le même comportement. Pour la période 1961-1975, les pourcentages du nombre total de bris sont beaucoup plus élevés dans les municipalités A, C et D, que leurs pourcentages respectifs de tronçons. Les tronçons posés pendant cette période sont encore plus "à risque" que ceux posés pendant la période précédente. Les tronçons de la municipalité B ne démontrent pas le même comportement. Pour la période récente, et tel que prévu, le pourcentage du nombre total de bris est beaucoup plus bas que leurs pourcentages respectifs de tronçons, pour toutes les municipalités. Ce comportement est plus marqué dans les municipalités C et D. En général, et bien que ce soit assez surprenant, ce ne sont pas les plus vieux tronçons qui brisent le plus pendant la période archivée. Les tronçons posés durant la période 1961-1975 présentent le plus haut taux de bris, suivis de ceux posés durant la période 1945-1960.

La Figure 4.9 présente le pourcentage de tronçons pour différents types de matériau dans les quatre municipalités à l'étude. La fonte grise est le matériau le plus répandu dans les quatre municipalités. La fonte ductile est le deuxième matériau d'importance dans les municipalités A, C et D, bien que la municipalité C ait un pourcentage semblable de tronçons en fonte grise et en fonte ductile. Le troisième matériau d'importance dans les municipalités A et C est le PVC. Exceptionnellement, la municipalité B a plus de tronçons en PVC qu'en fonte ductile et la municipalité D n'utilise pas de PVC. Elle utilise plutôt du ciment-amiante (non-présenté sur la figure) dans un pourcentage de 1.5% de ses tronçons. Le quatrième matériau utilisé est l'Hyprescon^{MD}, pour 1.3% des tronçons de la municipalité B.

La Figure 4.10 présente le pourcentage du nombre total de bris pour différents types de matériau dans les quatre municipalités à l'étude. La grande majorité des bris ont lieu sur les tronçons en fonte grise. Le pourcentage du nombre total de bris est toujours plus élevé que le pourcentage de tronçons respectif, ce qui classifie la fonte grise comme matériau "à risque". Pour la fonte ductile, les pourcentages du nombre total de bris sont plus bas que les pourcentages de tronçons respectifs dans les municipalités A, C et D. Le pourcentage du nombre total de bris est plus élevé dans la municipalité B, mais c'est aussi celle qui possède le moins de tronçons de ce matériau. Pour le PVC, les pourcentages du nombre total de bris sont beaucoup plus bas que les pourcentages de tronçons respectifs dans les municipalités A, B et D. Ce comportement n'est pas aussi marqué dans le cas de la municipalité B, où le PVC est très utilisé. Pour le ciment-amiante et l'Hyprescon^{MD}, les pourcentages du nombre total de bris sont très bas.

Il est important de noter qu'il existe une corrélation entre le type de matériau et la période d'installation, puisque différents matériaux ont été utilisés à différentes périodes. La fonte grise a été utilisée exclusivement durant les deux premières périodes d'urbanisation ("avant 1945" et 1945-1960) dans les quatre municipalités, puis a été utilisée conjointement avec la fonte ductile pendant la troisième période (1961-1975) dans toutes les municipalités, puis son utilisation a cessé avant le début de la dernière période (1976-1996), sauf dans la municipalité D. L'utilisation de la fonte ductile a commencé pendant la troisième période et a continué durant la période récente, sauf pour la municipalité B. L'utilisation du PVC a débuté pendant la troisième période dans la municipalité B, et pendant la quatrième pour les municipalités A et C. L'utilisation du ciment-amiante a commencé pendant la période récente dans la municipalité D et la municipalité B a toujours utilisé l'Hyprescon^{MD}.

4.4 Synthèse

À propos de l'influence du diamètre, nous avons observé que les conduites de petits diamètres brisent plus souvent, tel que rapporté à maintes reprises dans la littérature. Cela est probablement dû à la plus petite épaisseur des parois, mais aussi au fait que les bris sur les petits diamètres sont plus souvent répertoriés car ils rendent fréquemment la conduite inopérante, contrairement aux bris sur les grands diamètres. À la lumière du fait que : (1) nous travaillons avec de courts historiques; (2) seulement une partie des bris, déjà peu nombreux, ont pu être liés au tronçon sur lequel ils ont eu lieu; (3) les conduites de 0.1 à 0.2 m forment la grande majorité des quatre réseaux à l'étude; et (4) les conduites d'autres diamètres sont

somme toute peu nombreuses; il semble à première vue que ces données ne se prêtent pas bien à l'obtention d'une régression linéaire significative pour estimer l'influence du diamètre sur le taux de bris. De plus, la séparation des données pour une modélisation par catégorie de diamètres n'est certainement pas une bonne idée puisque seule la catégorie 0.1 à 0.2 m possède un échantillon de taille acceptable.

L'observation faite par plusieurs chercheurs que les bris tendent à se reproduire aux mêmes endroits plutôt que d'être uniformément répartis sur un réseau a été confirmée par les études de Goulter et Kazemi (1988) et Goulter et al. (1993) sur le regroupement spatial mais aussi temporel des bris. Ce phénomène a aussi été observé dans cette étude, particulièrement dans la municipalité A (probablement à cause du plus long historique). En effet, dans cette municipalité, 7 tronçons ont brisé 20 fois et plus, 31 tronçons ont brisé 10 fois et plus et 115 tronçons ont brisé 5 fois et plus. Dans les municipalités A et C, 34.2% des tronçons ont déjà brisé. Dans les municipalités B et D, les pourcentages sont de 17.3% et de 11.5%, respectivement. Les analyses présentées montrent aussi que le taux de bris augmente généralement avec la longueur dans toutes les municipalités à l'étude. Évidemment, plus un tronçon est long, plus il est probable qu'il brise. Il aurait été intéressant d'approfondir l'analyse des données de la municipalité A au niveau du regroupement spatial et temporel des bris. Puisque les données n'étaient pas géo-référencées et à cause de la structure de la table AQUEDUC, il était difficile d'identifier les tronçons voisins, ce qui aurait permis de faire ce type d'étude. C'est une des recommandations pour recherche future.

La période d'installation reflète l'âge des tronçons au moment de l'analyse ainsi que les spécificités locales associées aux techniques d'installation, aux techniques de manufacture, aux types de matériaux, etc. Il ressort de cette analyse que ce ne sont pas les tronçons les plus âgés qui brisent le plus et que les tronçons installés pendant la période 1961-1975 brisent le plus souvent dans toutes les municipalités, sauf dans la municipalité B pour laquelle ce sont ceux installés pendant la période 1945-1960 qui présentent ce comportement. Il est à noter que seules les municipalités A et B ont posé des tronçons avant 1945, en faible proportion. Dans un contexte de détérioration des conduites métalliques due à la corrosion interne et externe des parois, une modélisation basée sur l'analyse de survie regroupant tous les tronçons (par opposition à par classe de tronçons) produira nécessairement plus de bris sur les conduites plus âgées. Pour modifier ce comportement du modèle afin de tenir compte du risque plus élevé de briser dans une période d'installation autre que la plus ancienne, il faut diviser les tronçons par classe de période d'installation. Dans le contexte de courts historiques de bris, il n'est possible de diviser les tronçons qu'en

deux classes afin d'obtenir des échantillons par classe (nombre de tronçons et de bris associés) de taille statistiquement significative. Une analyse plus poussée des données des municipalités A et C a permis d'identifier plus finement la division des tronçons nécessaire pour reproduire au mieux le comportement observé en terme de bris, soit les tronçons installés avant et après 1960. En effet, les tronçons posés après 1960 se comportent moins bien que ceux posés avant. Ce comportement a été pris en compte lors de la modélisation par deux jeux de paramètres de calage. Il est à noter que bien que les tronçons de la période récente sont ainsi regroupés avec ceux plus à risque de la période 1961-1975, ils ont peu d'impact sur le nombre de bris annuel observés.

Tel que mentionné précédemment, le type de matériau est intimement lié à la période d'installation puisque différents matériaux ont été utilisés à différentes époques. Dans le cas du PVC, il existe aussi une corrélation avec le diamètre, puisque celui-ci est le plus souvent utilisé pour les petits diamètres. Dans le cas de la municipalité A, le PVC est même exclusivement utilisé pour les petits diamètres alors que c'est la fonte ductile qui est utilisée pour les diamètres supérieurs à 0.2 m. Dans toutes les municipalités à l'étude, les conduites en fonte grise brisent le plus souvent. Il est difficile de tirer des conclusions quant au comportement du PVC puisque ce matériau n'est utilisé que depuis 20 ans (début des années 1980). La prochaine décennie devrait nous éclairer sur la performance de ce matériau. Le phénomène de vieillissement des conduites en PVC est différent du phénomène général d'affaiblissement des conduites, qui résulte de la corrosion pour la fonte grise et ductile. Il serait intéressant d'avoir accès aux rapports de tests effectués par les manufacturiers de conduites en PVC afin de connaître les diverses causes des bris. Cet aspect n'a pas été développé dans le cadre de cette thèse.

Il est à noter que l'année 1960 ne correspond pas à l'introduction de la fonte ductile dans les municipalités à l'étude puisqu'elle a plutôt eu lieu vers le début des années 1970. Sachant que les conduites en fonte ductile brisent moins souvent que celles en fonte grise, mais que les conduites posées après 1960 brisent plus souvent que celles posées avant, il faut conclure que ce sont les conduites en fonte grise posées après 1960 qui causent tant de dégâts. Il n'est pas possible d'identifier les causes exactes de ce problème, nous pouvons simplement penser qu'un ou plusieurs facteurs liés aux techniques de manufacture ou d'installation en sont responsables. Bien que ce soit de façon imparfaite, la séparation des données en deux jeux dépendant du critère "avant" et "après" 1960 prend en compte l'influence du type de matériau.

Finalement, puisque la très grande majorité des tronçons étaient associés à une occupation du sol qualifiée de “faible densité” ou de “résidentielle” et à un type de sol dominant pour chacune des municipalités à l'étude, et puisque ces données étaient très grossièrement déterminées, ces facteurs n'ont pas été inclus dans la stratégie de modélisation.

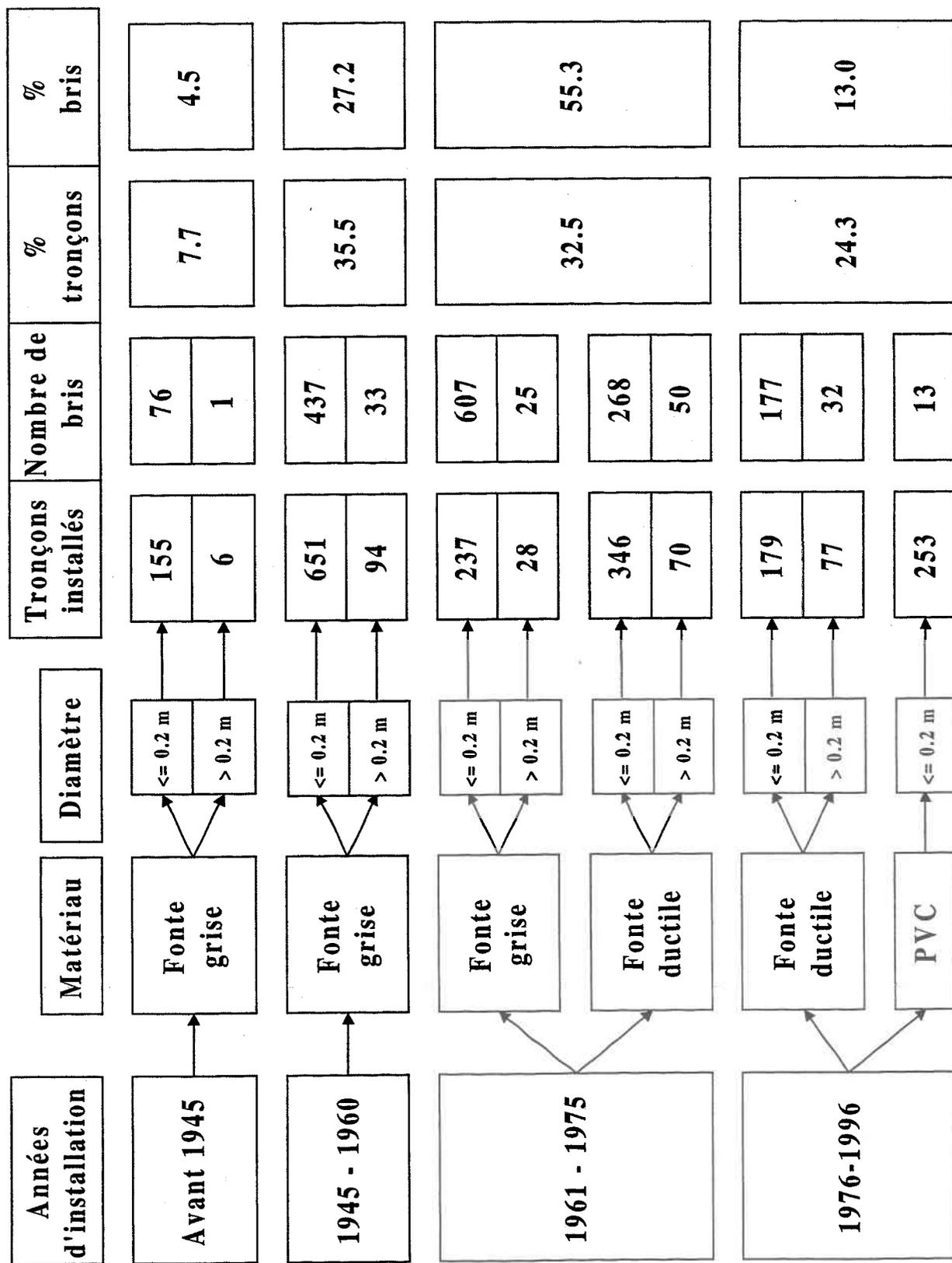
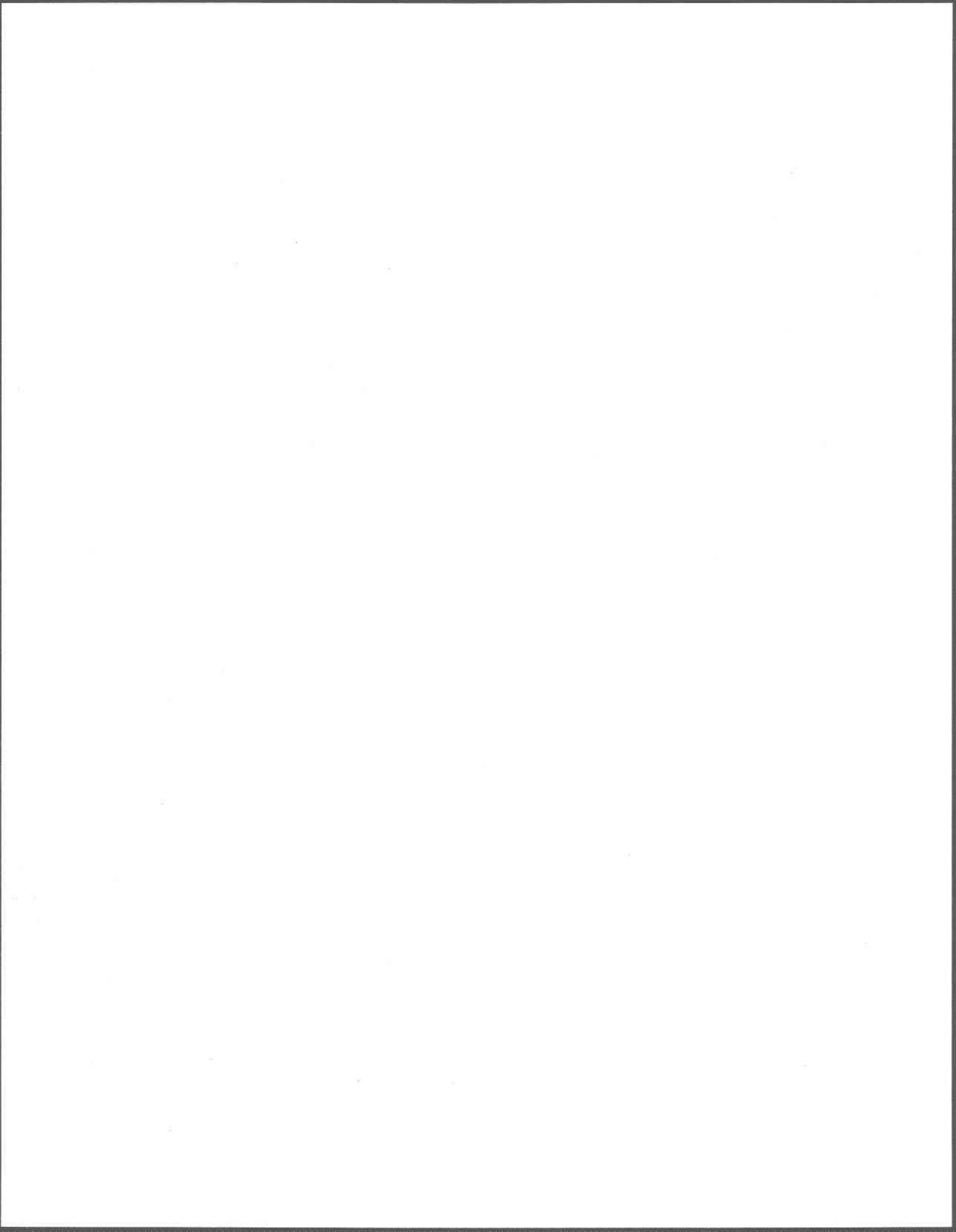


Figure 4.1 Schéma-résumé pour la municipalité A



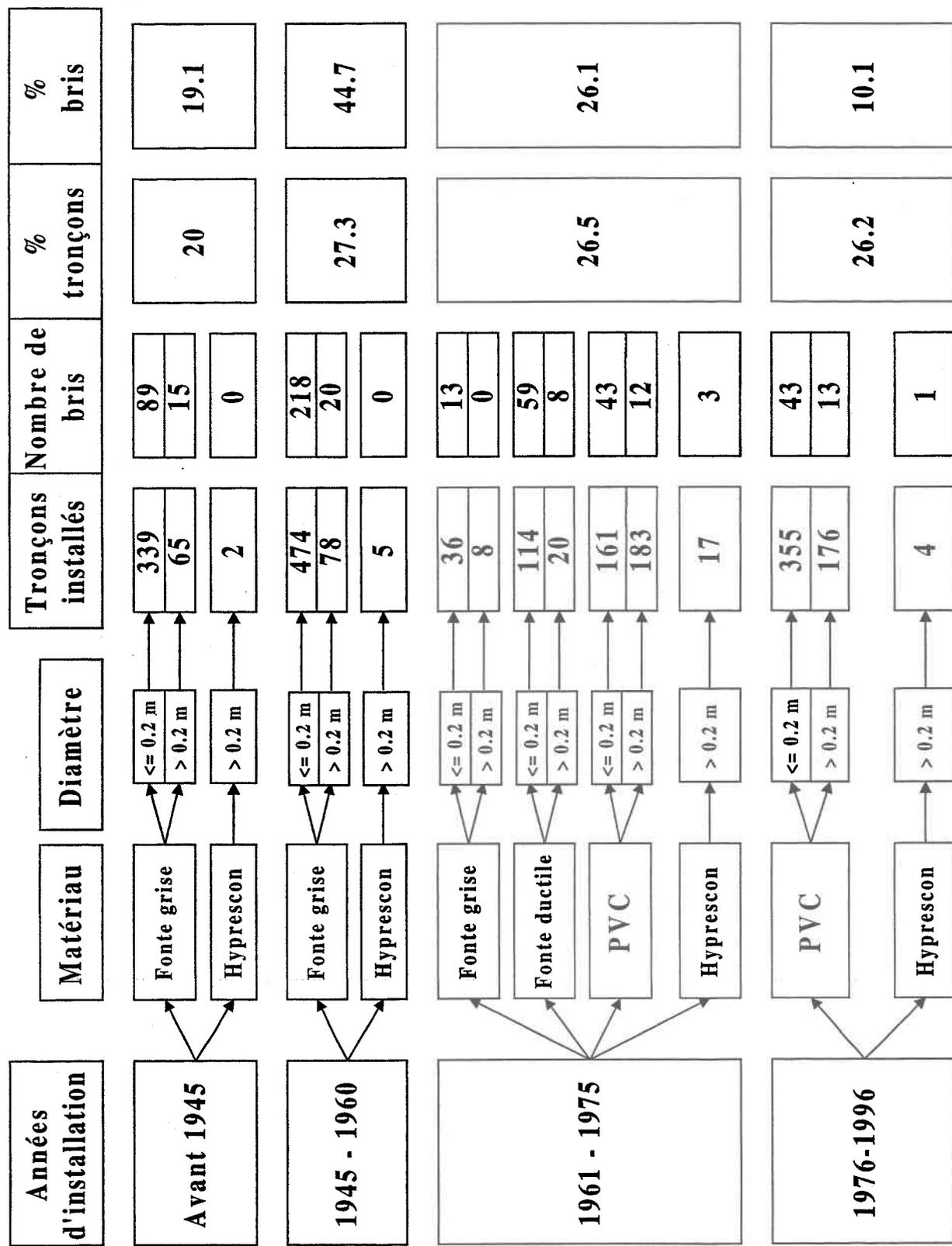
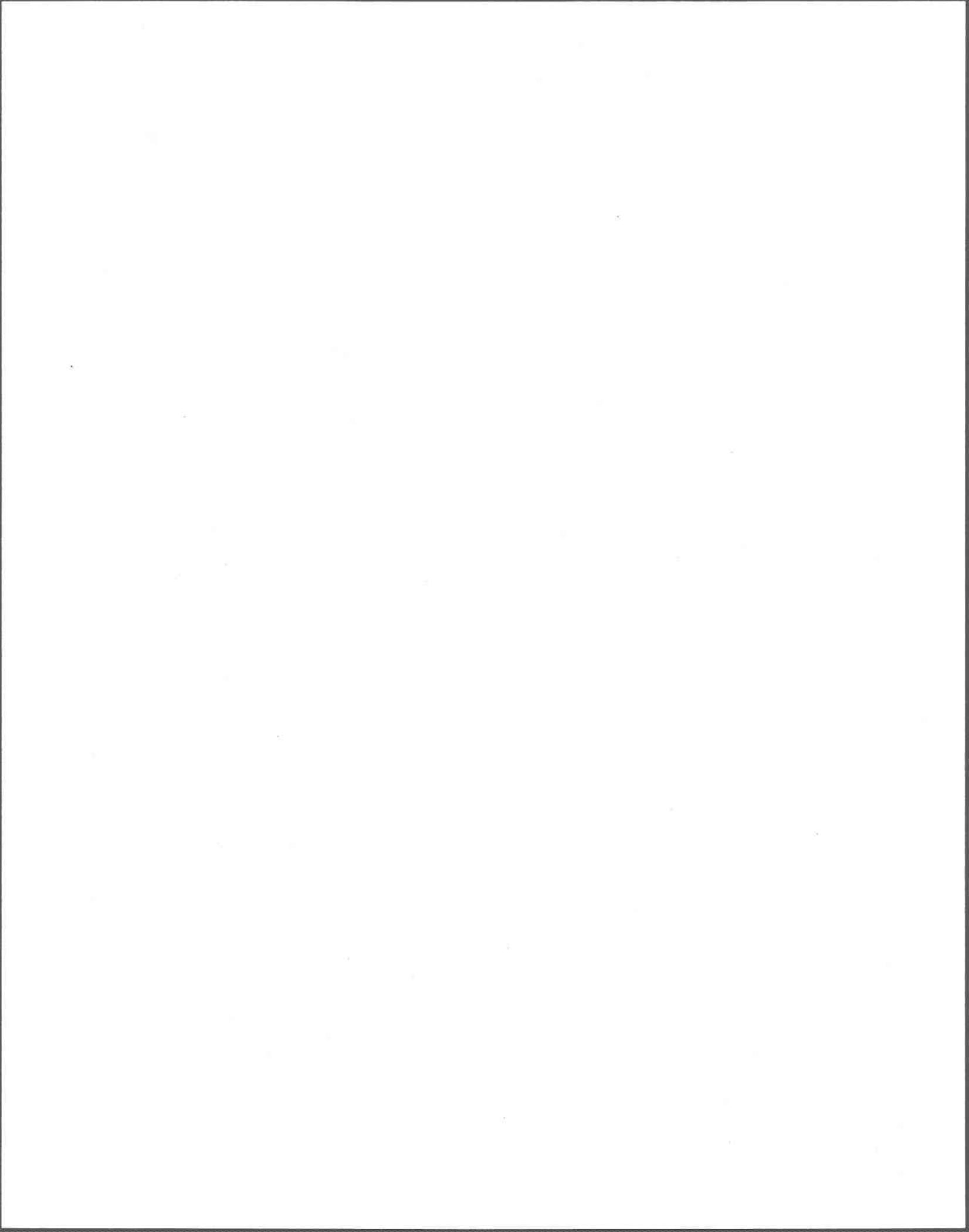


Figure 4.2 Schéma-résumé pour la municipalité B



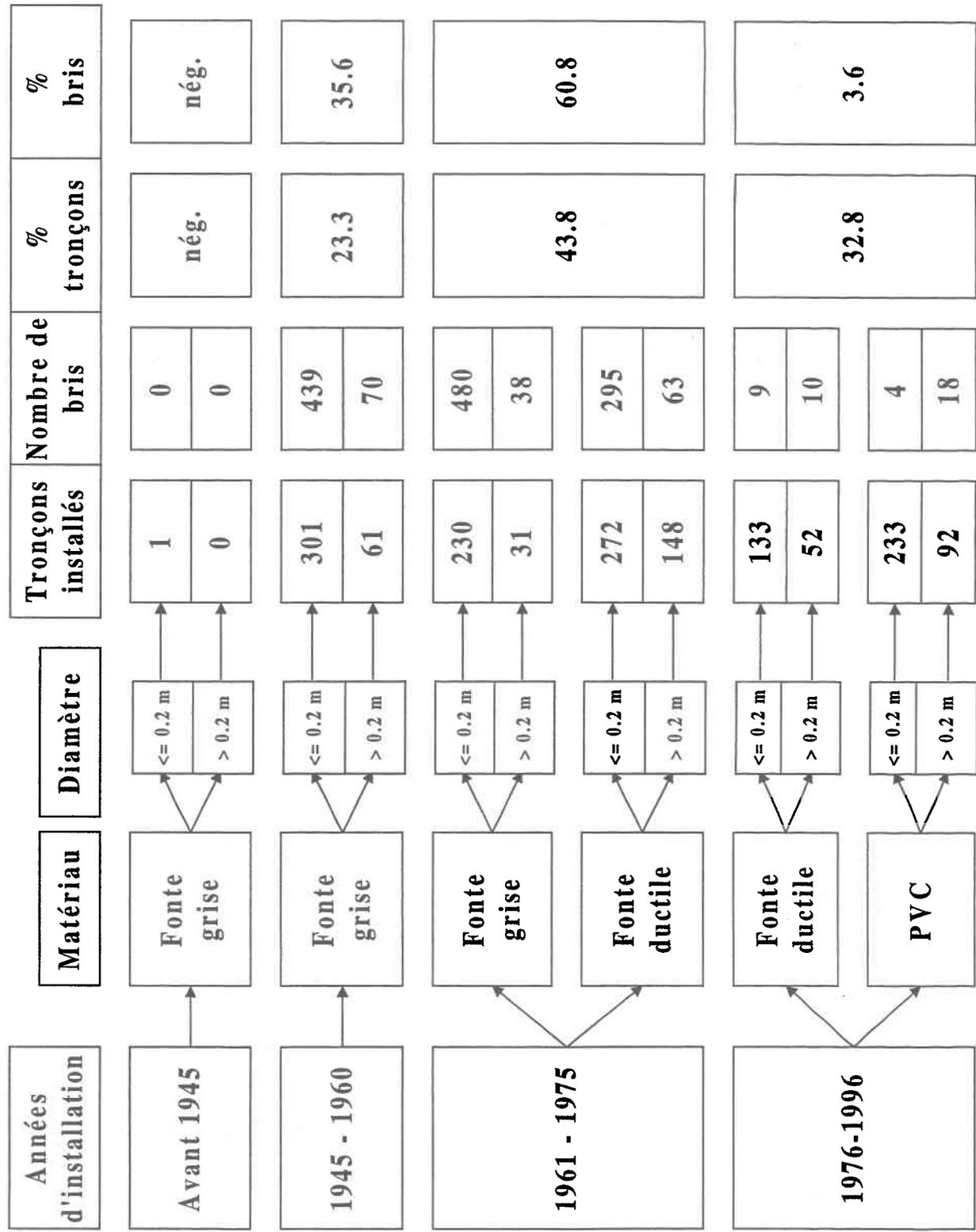
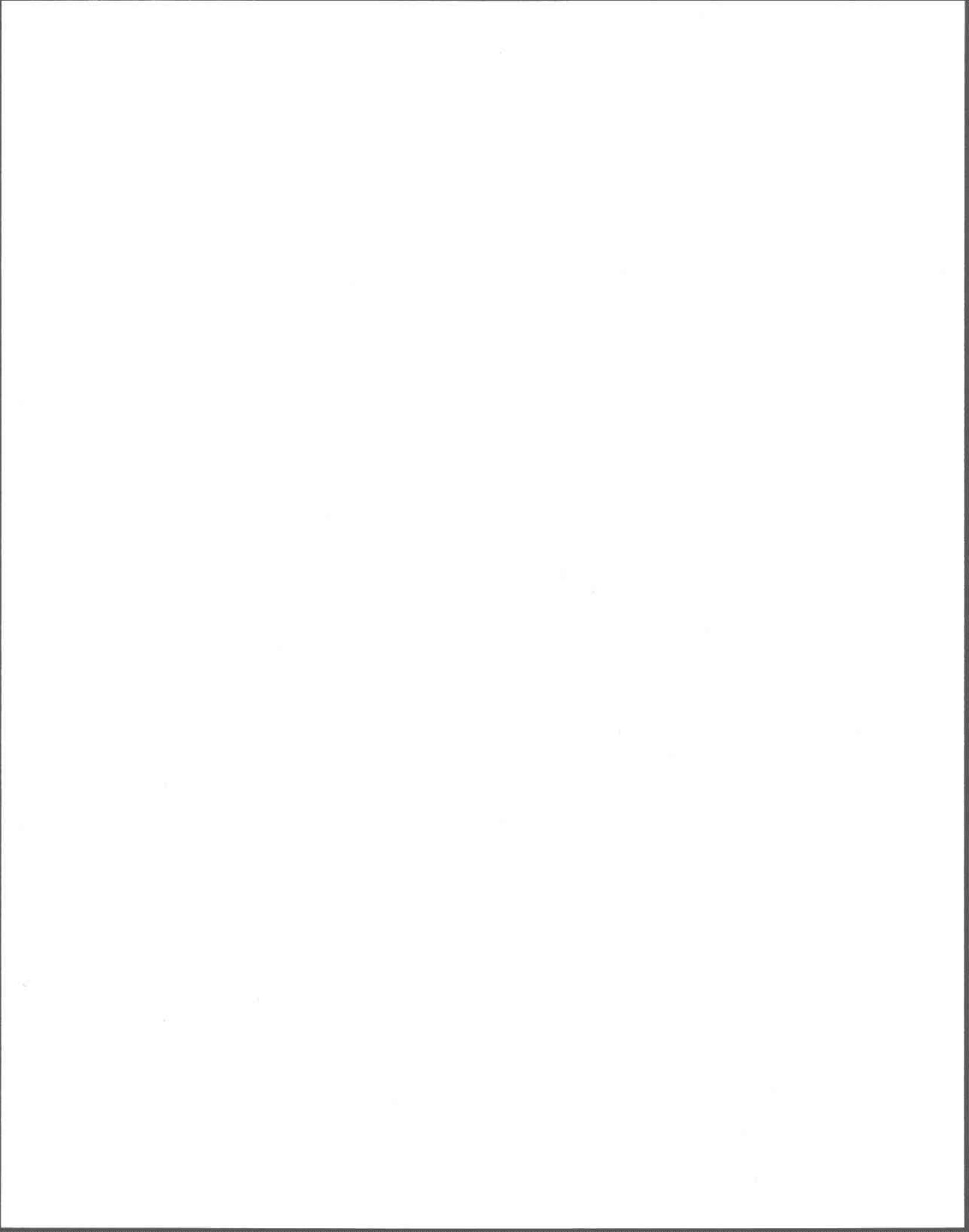


Figure 4.3 Schéma-résumé pour la municipalité C (sans les données de bris de l'année 1996)



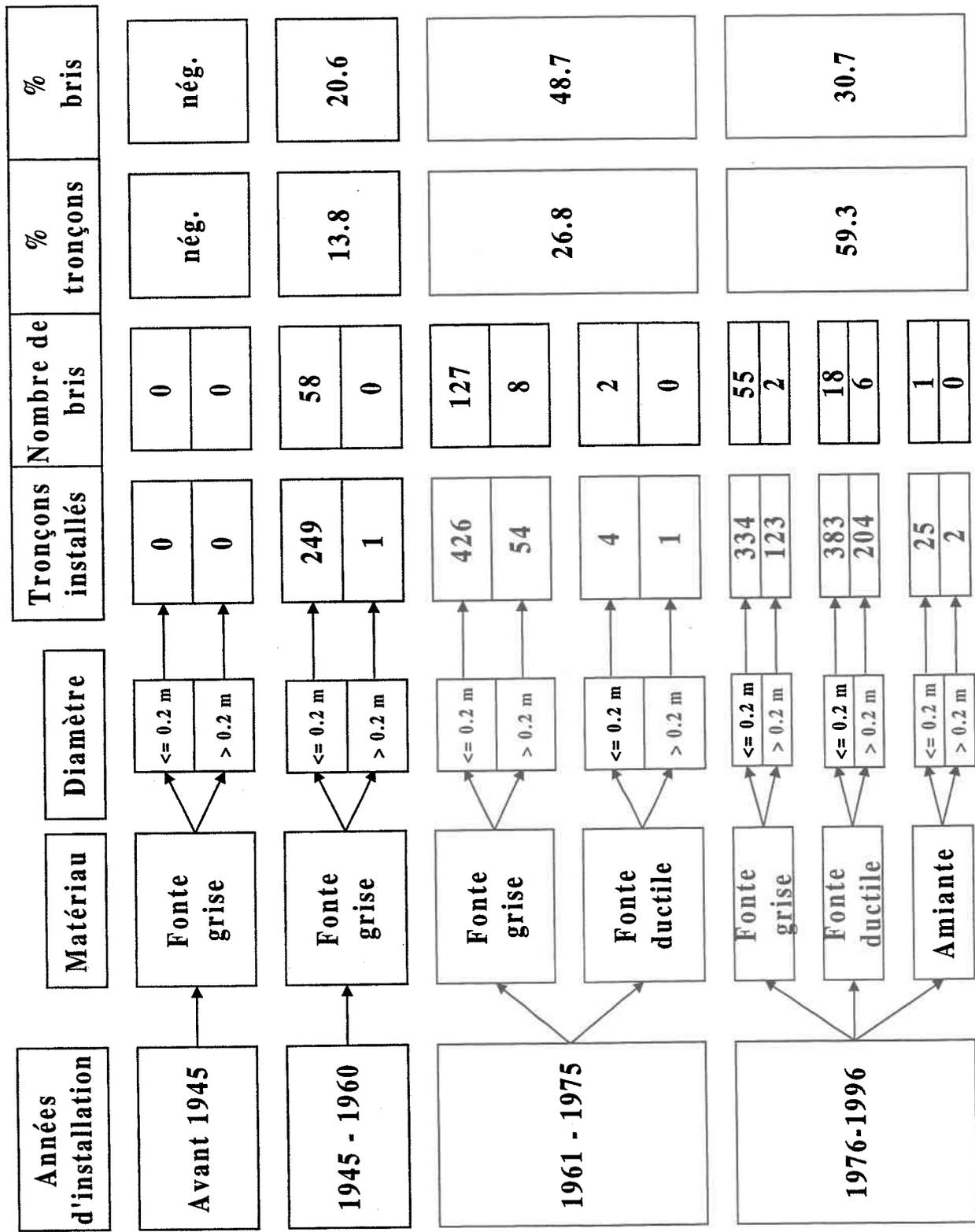
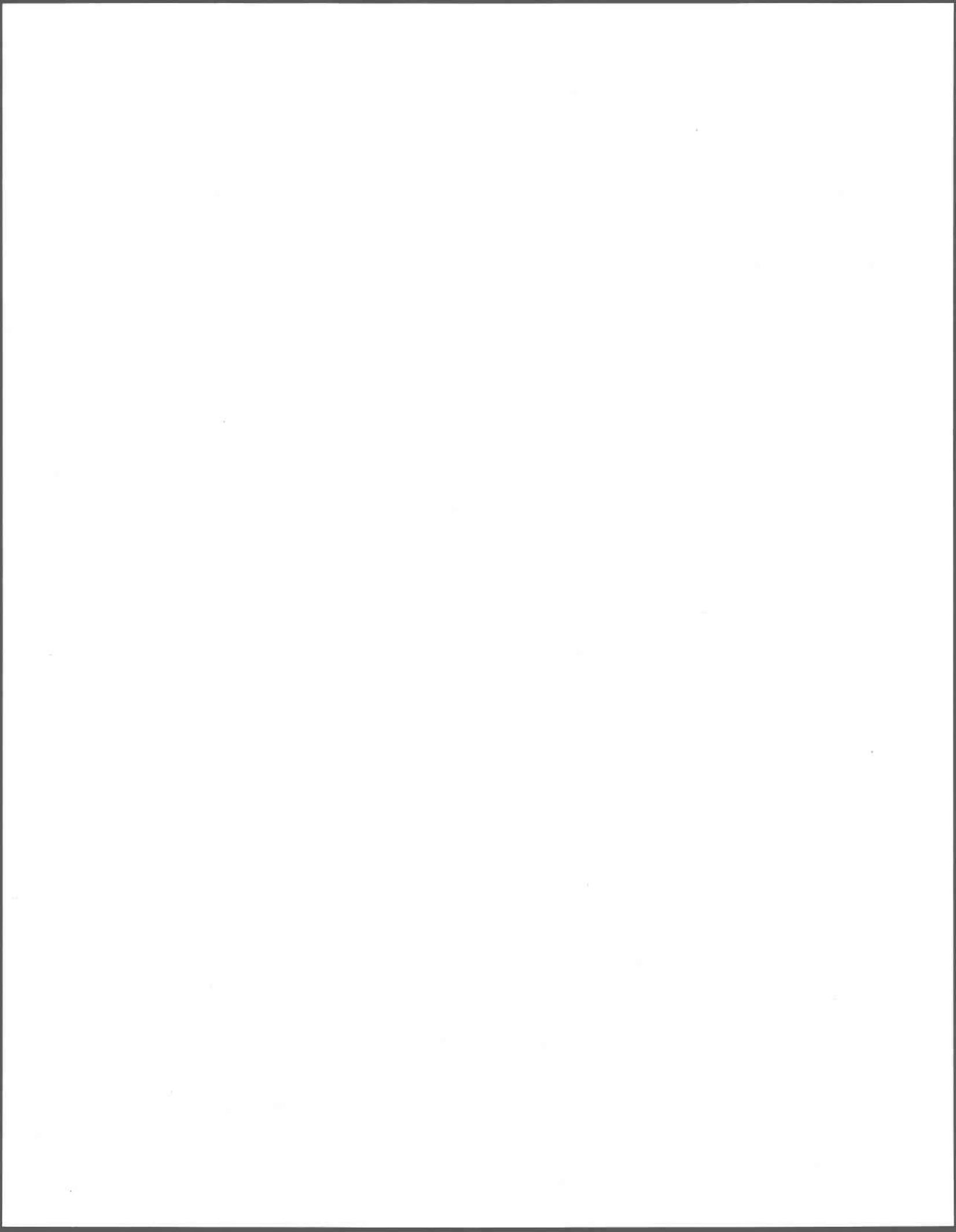


Figure 4.4 Schéma-résumé pour la municipalité D



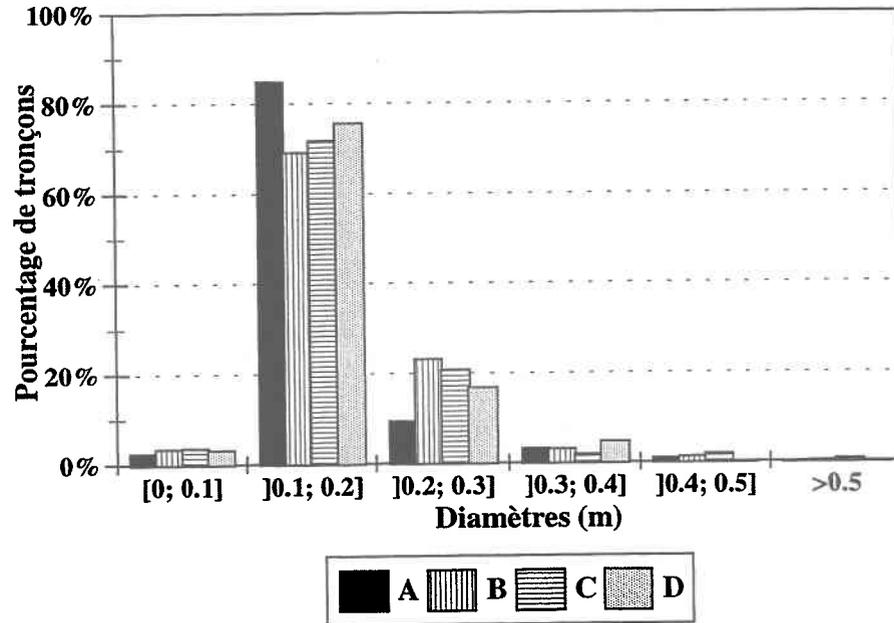


Figure 4.5 Pourcentages de tronçons dans différentes catégories de diamètres pour les quatre municipalités

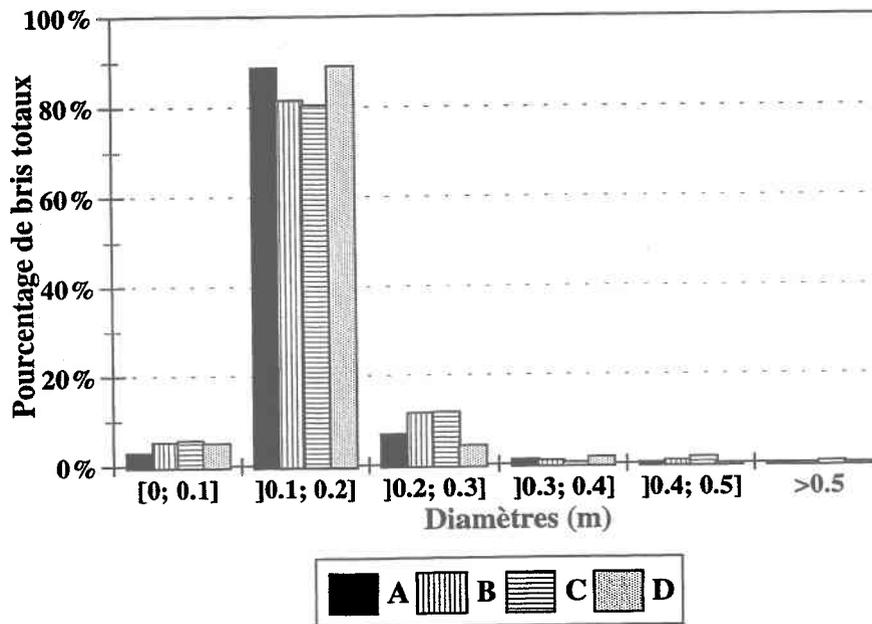
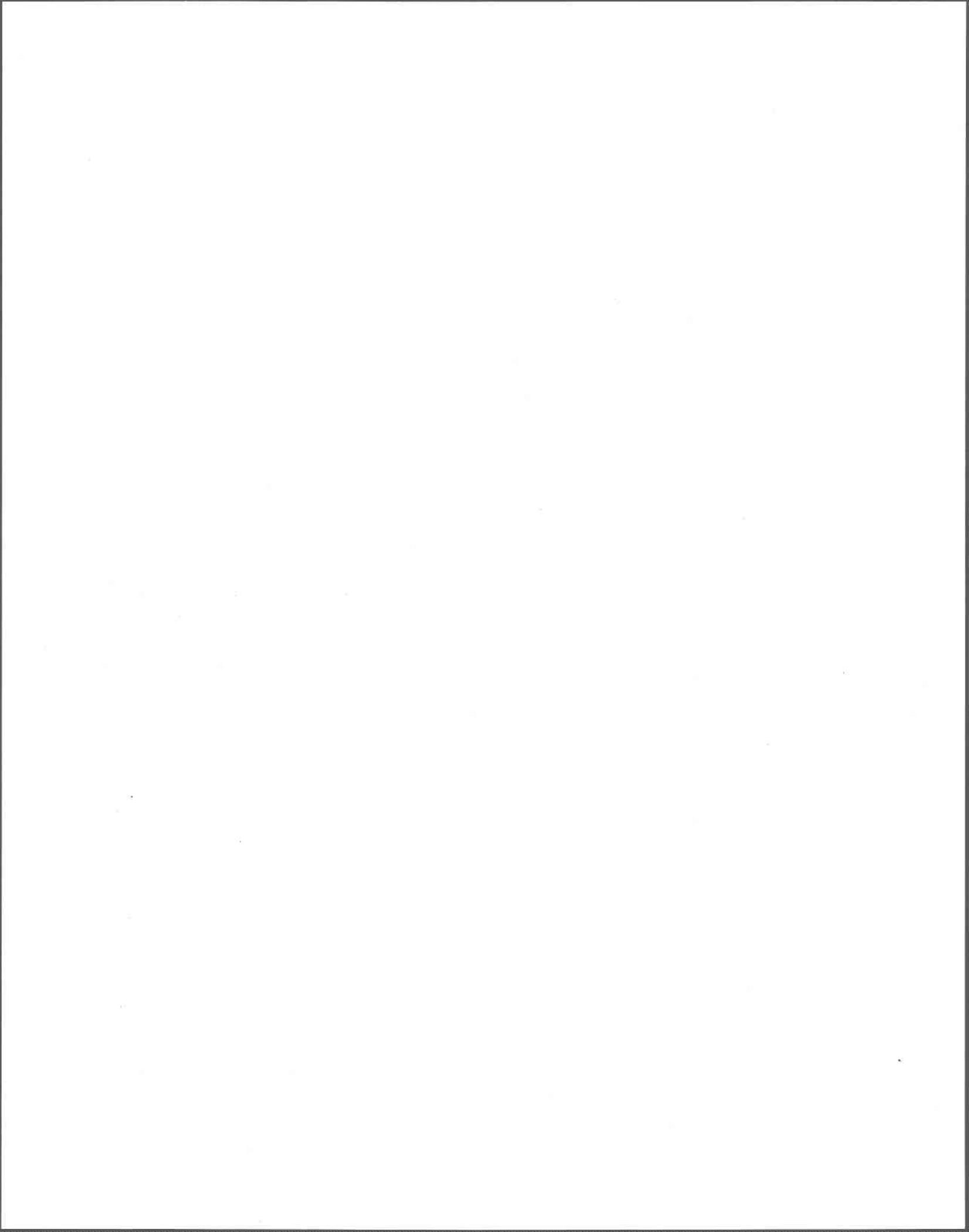


Figure 4.6 Pourcentages du nombre total de bris dans différentes catégories de diamètres pour les quatre municipalités



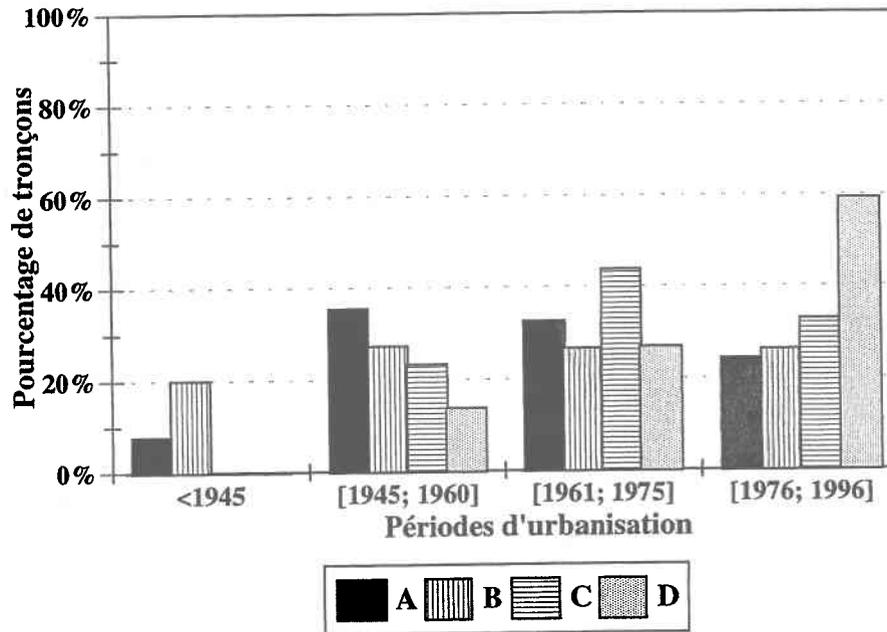


Figure 4.7 Pourcentages de tronçons pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités

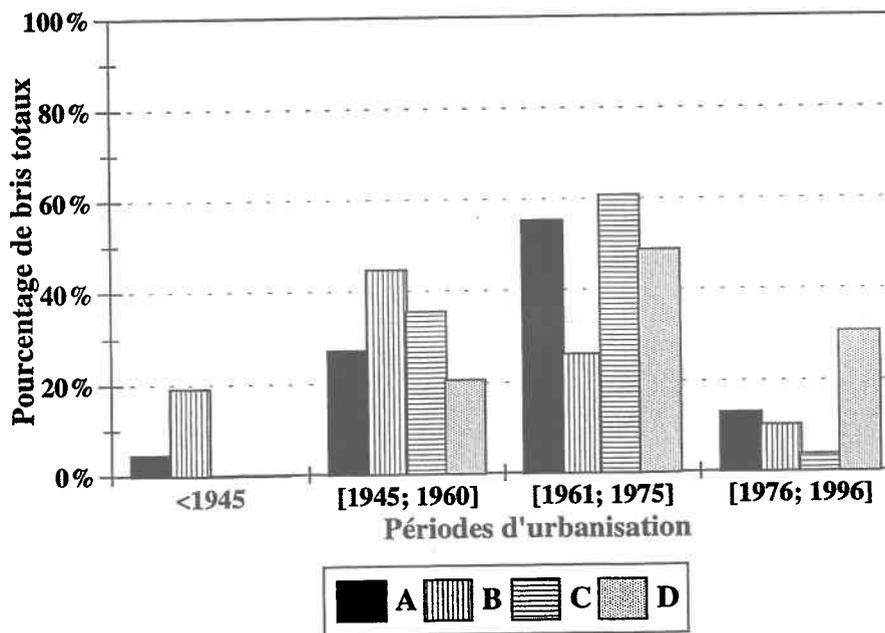
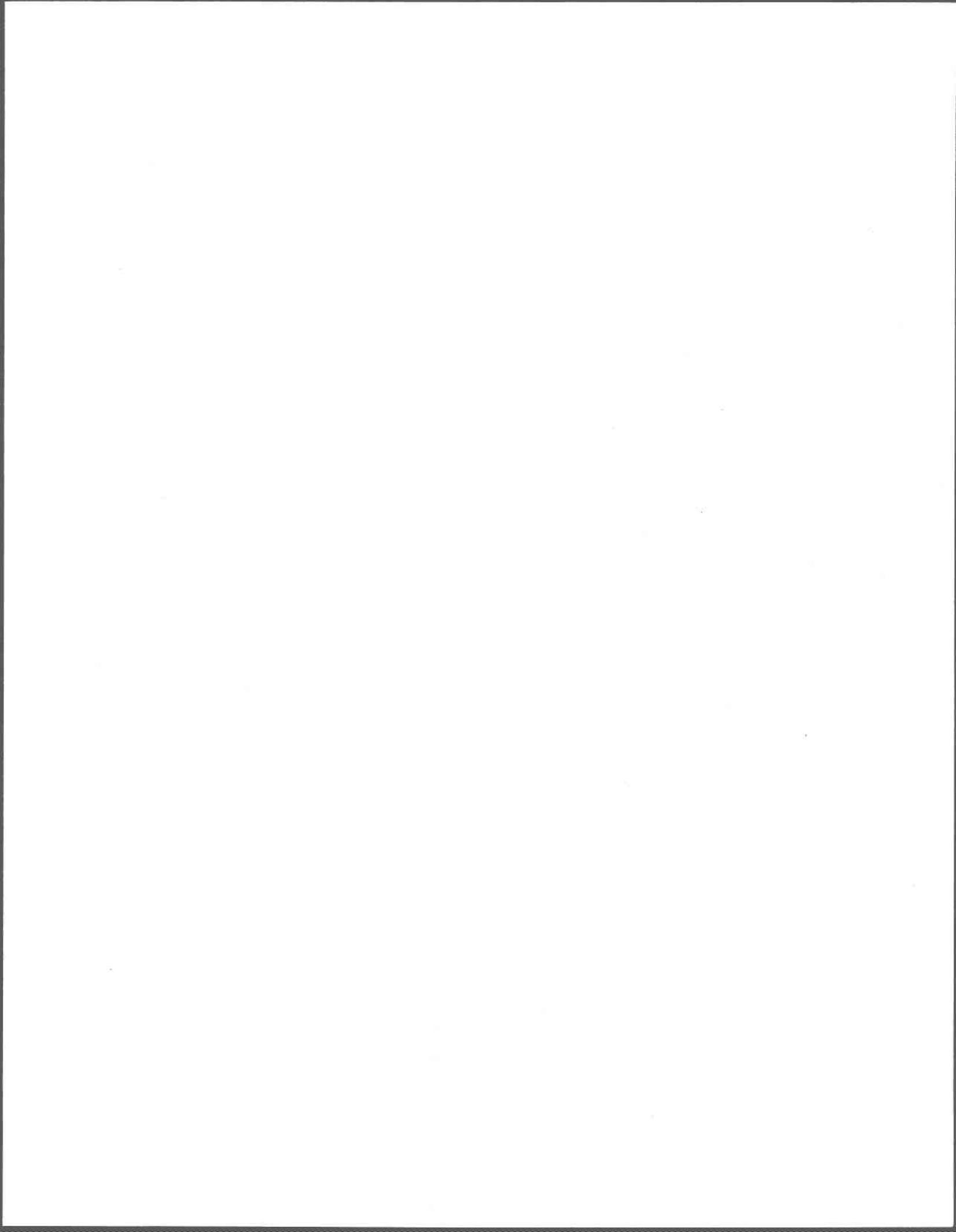


Figure 4.8 Pourcentages du nombre total de bris pour différentes périodes d'urbanisation dans les quatre municipalités



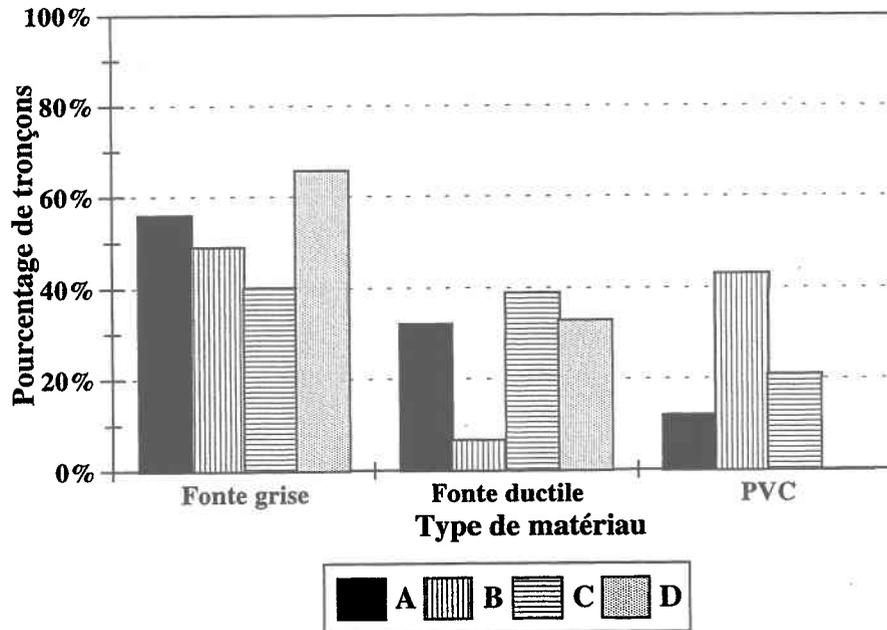


Figure 4.9 Pourcentages de tronçons pour différents types de matériau dans les quatre municipalités

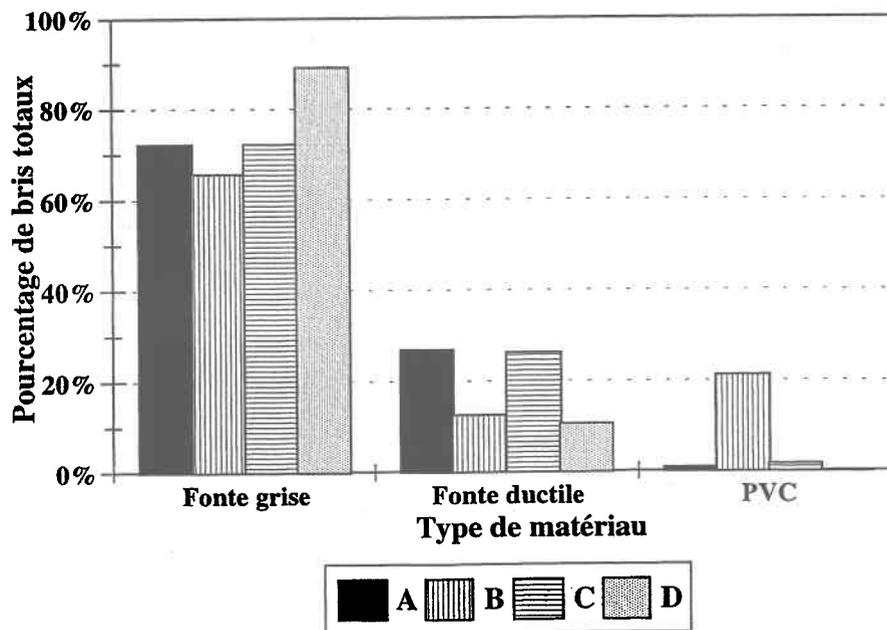
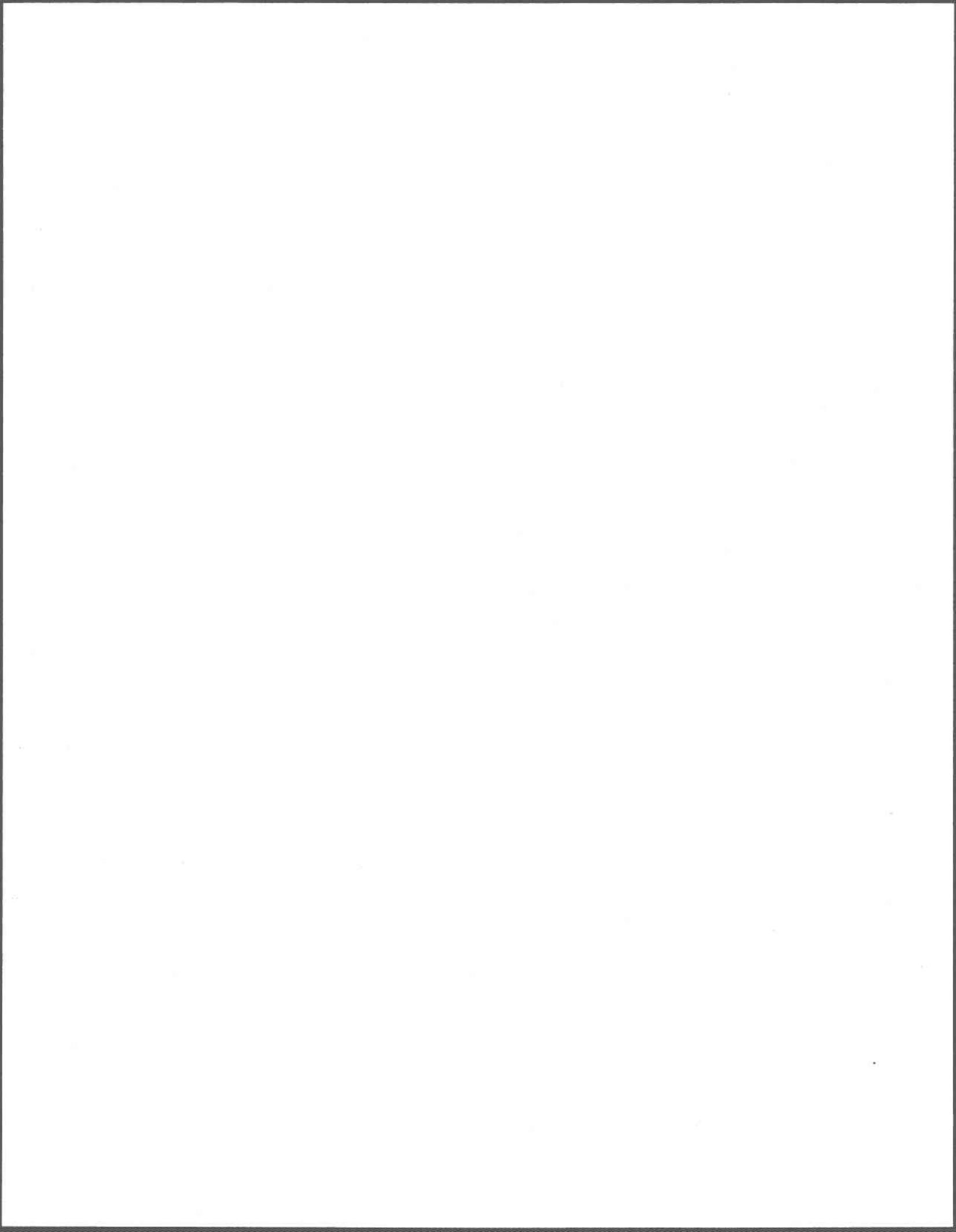


Figure 4.10 Pourcentages du nombre total de bris pour différents types de matériau dans les quatre municipalités



5 MODÉLISATION ET CALAGE

Tel que mentionné en introduction, les deux principaux buts de la recherche sont : (1) de développer un modèle opérationnel pour évaluer l'état structural présent et futur du réseau d'aqueduc de municipalités possédant de courts historiques de bris; et (2) d'estimer l'impact du remplacement des conduites sur le nombre annuel de bris. La stratégie de modélisation devait être adaptée à la quantité et à la qualité des données généralement disponibles dans les municipalités québécoises. Suite à la revue de littérature, l'analyse de survie a été choisie comme stratégie de modélisation la plus appropriée pour la problématique de la détérioration des conduites d'aqueduc. L'analyse de survie est une méthode d'analyse statistique permettant l'estimation des paramètres de la distribution choisie pour modéliser les temps de survie, en maximisant la fonction de vraisemblance associée à la distribution. Cette méthode prend en compte l'absence de bris par "césure à droite" ("right-censoring", voir Cox et Oakes, 1994). En effet, ce concept permet d'inclure dans l'analyse le temps entre la pose et l'analyse pour toutes les conduites n'ayant jamais brisé (ces conduites étant fortement majoritaires dans la plupart des municipalités) et le temps entre le dernier bris enregistré et l'analyse pour les conduites ayant brisé.

La revue de littérature a permis d'identifier le nombre de bris antérieurs comme facteur de risque le plus important à inclure dans l'analyse. Afin de tenir compte de ce facteur de risque, les temps de survie sont regroupés en deux strates (premiers bris et bris subséquents) qui sont modélisés séparément. L'analyse plus poussée des données des municipalités A et C (deux plus longs historiques) a permis d'identifier un autre facteur de risque ayant une influence majeure sur le taux de bris : le fait qu'un tronçon ait été installé avant ou après 1960. Pour ces deux municipalités, ce facteur de risque a aussi été pris en compte en modélisant séparément ces deux groupes de données.

Les analyses réalisées lors du développement de la stratégie de modélisation nous ont permis de réfléchir à l'impact des courts historiques sur les résultats de l'analyse de survie. En effet, l'analyse de survie "classique" nécessite que les temps de survie soient connus pour tout l'historique du réseau, ou du moins, pour la période écoulée depuis la pose d'une grande partie des tronçons (on utilise alors cet échantillon s'il est représentatif de l'ensemble du réseau). Puisqu'un tel échantillon n'est pas représentatif de l'ensemble du réseau dans le cas des municipalités à courts historiques de bris (mais uniquement représentatif des jeunes conduites), il a été nécessaire de développer une stratégie originale pour prendre

en compte le fait que non seulement les temps de survie ne sont pas connus pour la période non-archivée, mais le nombre de bris antérieurs subis par les conduites est aussi inconnu. Ces observations ont mené au développement d'une stratégie de calage originale, formellement exacte et parfaitement adaptée aux courts historiques de bris.

5.1 Stratégie de modélisation

Le modèle basé sur l'analyse de survie le plus souvent cité dans la littérature est le modèle de Cox. Toutefois, puisque la structuration des données n'a permis de lier qu'un certain pourcentage des bris à un tronçon d'aqueduc sur lequel ils ont eu lieu dans tous les cas d'application et que l'analyse descriptive a démontré qu'une régression linéaire entre les facteurs de risque identifiés et le taux de bris ne donneraient pas de résultats significatifs, il a été décidé de concentrer nos efforts de modélisation sur le développement d'une stratégie originale basée sur l'analyse de survie mais adaptée aux courts historiques de bris, prenant en compte les deux facteurs de risque majeurs mentionnés précédemment. Cette section présente d'abord les fonctions de base d'analyse de survie, puis les distributions Weibull et exponentielle, la fonction de vraisemblance et enfin le modèle proposé.

5.1.1 Fonctions de base

L'analyse de survie sert à modéliser les données relatives aux temps de survie. Dans le cas des bris d'aqueduc, les temps de survie sont les intervalles de temps entre l'installation et le premier bris, puis entre les bris subséquents et enfin, entre le dernier bris observé et le temps d'analyse. Plusieurs livres sont consacrés à l'analyse de survie, dont : Kalbfleisch et Prentice (1980), Cox et Oakes (1994) et Miller (1981). Les temps de survie peuvent être analysés par des distributions statistiques, telles celle de Weibull ou exponentielle, qui sont exprimées mathématiquement par trois fonctions : la fonction de survie, de densité de probabilité et de risque. La fonction de survie, $F(t)$, présentée à l'Équation 5.1, est définie comme étant la probabilité que le temps de survie, T , d'un élément provenant d'une population homogène (T est une variable aléatoire non-négative), soit égal ou surpasse un certain temps, t .

$$F(t) = P(T \geq t) \quad t \in [0, \infty] \quad (5.1)$$

Si T est une variable continue, la fonction de densité de probabilité, $f(t)$, de la variable T est définie telle que présentée à l'Équation 5.2.

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t} = -\frac{dF(t)}{dt} \quad (5.2)$$

La fonction de survie peut donc s'écrire en terme de la fonction de densité de probabilité, de la façon suivante :

$$F(t) = \int_t^{\infty} f(u) du \quad (5.3)$$

La fonction de risque, $\lambda(t)$, est définie comme étant la probabilité instantanée de bris au temps $T = t$, sachant que l'élément a survécu jusqu'au temps t , et s'exprime sous la forme présentée à l'Équation 5.4. On voit que les fonctions de survie, de densité de probabilité et de risque sont interdépendantes et peuvent toutes être exprimées en terme, par exemple, de la densité de probabilité.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \frac{P(t \leq T < t + \Delta t | T \geq t)}{\Delta t} = \frac{f(t)}{F(t)} \quad (5.4)$$

5.1.2 Distributions Weibull et exponentielle

Les deux distributions les plus utilisées pour modéliser les temps de survie des tronçons d'aqueduc sont les distributions de Weibull et exponentielle (Eisenbeis, 1994). La distribution de Weibull est une fonction à deux paramètres, κ et p . La fonction de survie associée à la distribution de Weibull est présentée à l'Équation 5.5. La distribution exponentielle est un cas spécial de la distribution Weibull lorsque le paramètre $p = 1$. Elle comporte un seul paramètre, κ_2 . La fonction de survie de la distribution exponentielle est présentée à l'Équation 5.6.

$$F(t) = \exp\left[-(\kappa t)^p\right] \quad (5.5)$$

$$F(t) = \exp(-\kappa_2 t) \quad (5.6)$$

Les fonctions de densité de probabilité des distributions Weibull et exponentielle sont présentées aux Équations 5.7 et 5.8, respectivement.

$$f(t) = \kappa p (\kappa t)^{p-1} \exp[-(\kappa t)^p] \quad (5.7)$$

$$f(t) = \kappa_2 \exp(-\kappa_2 t) \quad (5.8)$$

Enfin, les fonctions de risque des distributions Weibull et exponentielle sont présentées aux Équations 5.9 et 5.10, respectivement.

$$\lambda(t) = \kappa p (\kappa t)^{p-1} \quad (5.9)$$

$$\lambda(t) = \kappa_2 \quad (5.10)$$

La fonction de risque de la distribution Weibull présente trois comportements distincts selon la valeur du paramètre, p : accroissement monotone lorsque $p > 1$, décroissement monotone lorsque $p < 1$, et indépendante du temps lorsque $p = 1$ (cas de la distribution exponentielle). L'accroissement monotone de la fonction de risque signifie que le risque de bris est petit au début de la vie utile du tronçon d'aqueduc et augmente avec le temps. C'est le comportement auquel nous nous attendons et il est donc à prévoir que le paramètre p du modèle sera plus grand que 1.

5.1.3 Fonction de vraisemblance

La fonction de vraisemblance est définie comme le produit de deux termes (Équation 5.11). Le premier terme est le produit sur chaque conduite i pour laquelle le temps de survie (t_i) n'a pas subi de césure à droite (ces conduites forment l'échantillon "n") tandis que le second est le produit sur chaque conduite i pour laquelle le temps de survie a subi une césure à droite (échantillon "c"). En termes simples : puisque la fonction de densité de probabilité, $f(t_i)$, décrit la probabilité de briser et la fonction de survie, $F(t_i)$, celle de ne pas briser, la fonction de vraisemblance décrit la probabilité globale d'observer des bris sur un réseau composé de conduites qui ont et qui n'ont pas brisé. En faisant l'hypothèse que la réalité observée est la situation la plus probable, la valeur maximale de la fonction de vraisemblance permet d'estimer les paramètres de la distribution choisie pour modéliser les temps de survie.

$$L = \prod_n f(t_i) \prod_c F(t_i) \quad (5.11)$$

Prendre le logarithme naturel permet de transformer le produit en somme :

$$l = \ln L = \sum_n \ln f(t_i) + \sum_c \ln F(t_i) \quad (5.12)$$

5.1.4 Modèle proposé

Le but de la modélisation est de reproduire adéquatement la tendance moyenne du nombre annuel de bris et de prévoir comment évoluera cette tendance dans le futur. Le pas de temps de la modélisation est d'un an. Le choix d'un pas de temps annuel est arbitraire mais intimement lié à l'échelle du phénomène de détérioration des conduites. En effet, un pas de temps annuel a l'avantage d'être court face au phénomène de vieillissement et d'intégrer le patron annuel des saisons. La stratégie de modélisation doit tenir compte de l'installation de nouveaux tronçons, du remplacement de tronçons et du fait que le comportement des conduites en terme de bris soit fortement influencé par l'historique des bris sur la conduite (*i.e.* dépend de l'ordre des bris). L'influence des caractéristiques physiques et environnementales des tronçons n'est pas pris en compte explicitement comme ce serait le cas avec le modèle de Cox. L'influence des différentes caractéristiques des conduites a été discutée lors de l'analyse descriptive au chapitre

précédent.

Le modèle proposé est similaire à ceux présentés par Eisenbeis (1994) et Andreou et al. (1987a) en ce sens que les données de temps de survie sont divisées en strates selon l'ordre des bris. Ces différentes strates sont ensuite modélisées par différentes distributions dépendant de l'ordre des bris. Comme Eisenbeis (1994), nous avons choisi d'utiliser les distributions de Weibull et exponentielle. Ce chercheur a utilisé une distribution de Weibull pour modéliser deux strates de données, soit : (1) de l'installation au premier bris; et (2) du premier au quatrième bris. Il a utilisé l'exponentielle pour la strate de tous les bris subséquents (quatrième bris et plus). Dans le cas d'Andreou et al. (1987a), la première strate (bris non fréquents) est modélisée par Weibull et la seconde (bris fréquents) est modélisée par une distribution de type Poisson. Dans ces deux cas, les distributions de Weibull sont utilisées dans le cadre du modèle de Cox, c'est-à-dire que la fonction de risque de la distribution choisie est multipliée par un facteur de stress prenant en compte différents facteurs de risque.

La particularité de notre recherche est qu'elle se penche sur la problématique de modélisation des bris d'aqueduc pour des municipalités à court historique de bris pour laquelle l'analyse de survie "classique" ne peut être appliquée. Afin d'avoir le plus grand nombre de données possibles par strate, les temps de survie ont été regroupés en deux strates qui sont modélisées séparément, soit : (1) la strate des temps de survie de l'installation au premier bris, modélisée par une distribution Weibull; et (2) la strate des temps de survie de tous les bris subséquents, modélisée par une distribution exponentielle. Le modèle proposé, ici nommé Weibull-exp., est la combinaison de ces deux distributions et dépend de trois paramètres de calage, soit les paramètres p et κ de la distribution Weibull et le paramètre κ_2 de l'exponentielle. La simplicité du modèle permet son utilisation pour des municipalités peu pourvues en données. La prise en compte du facteur de risque dépendant de l'installation avant et après 1960 pour les municipalités A et C est expliquée en détails au chapitre suivant puisque le modèle proposé reste le même mais qu'il est utilisé pour chacun des groupes de données.

5.2 Stratégie de calage

L'originalité de la thèse vient principalement du développement d'une stratégie de calage permettant d'étendre le domaine d'application de l'analyse de survie aux municipalités à court historique de bris. La méthodologie développée est différente de celle proposée par Eisenbeis (1994) car elle est formellement exacte et prend explicitement en compte le fait que nous ne savons pas combien ni quand ont eu lieu les bris pendant la période non-archivée. Il est important de noter que la stratégie de calage proposée est valide peu importe le type et le nombre de distributions utilisées pour modéliser les différentes strates de temps de survie. D'ailleurs, le type et le nombre de distributions utilisées détermineront le nombre de paramètres à caler. La stratégie de calage développée sera illustrée en prenant comme exemple le modèle proposé, Weibull-exp.

Le problème majeur des historiques courts est que l'ordre des bris durant la période archivée est inconnu pour tous les tronçons installés avant le début de l'archivage systématique des bris. La plupart des municipalités ont posé leurs premiers tronçons et même la majorité de leurs tronçons bien avant le début de l'archivage des bris. L'échantillon de tronçons dont l'historique de bris est totalement connu dans une municipalité est généralement restreint. Les résultats obtenus par l'analyse de survie pour cet échantillon seront peu représentatifs de l'ensemble du réseau. Une stratégie de calage basée sur une fonction de vraisemblance à optimiser a donc été développée pour estimer les valeurs des trois paramètres de calage associés au modèle proposé.

5.2.1 Développement général de la méthodologie de calage

La Figure 5.1 illustre le cas d'un tronçon i ayant brisé β fois durant la période archivée aux temps t_1, t_2, \dots, t_β et ayant brisé α fois durant la période non-archivée aux temps $t'_1, t'_2, \dots, t'_\alpha$. Le temps $T_0 = 0$ correspond au temps d'installation du tronçon i , T_b correspond au début de l'archivage des bris, et T_a correspond au temps d'analyse. Le $n^{\text{ième}}$ ordre de bris (compris entre 1 et $(\beta + \alpha)$ bris durant la vie du tronçon) est associé à une distribution statistique et ses fonctions de densité de probabilité, $f_n(t)$, de survie, $F_n(t)$, et de risque, $\lambda_n(t)$.

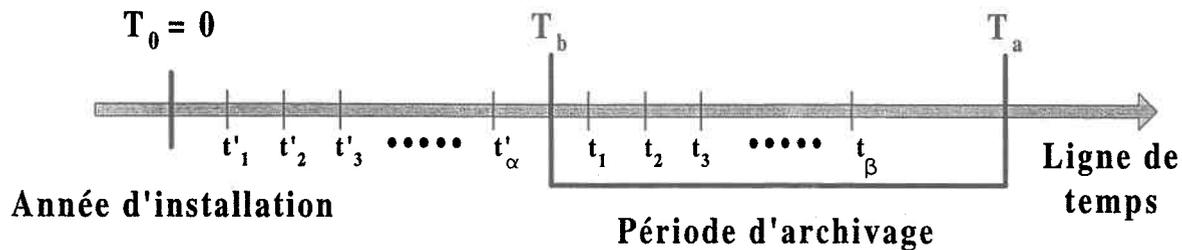


Figure 5.1 Définition des variables liées au temps

La probabilité $P(\alpha, \beta)$ pour un tronçon i définit la probabilité d'occurrence de β bris aux temps t_1, t_2, \dots, t_β durant la période archivée, considérant que ce tronçon a déjà brisé α fois durant la période non-archivée, peu importe quand ces α bris ont eu lieu durant cette période. En terme des différentes fonctions statistiques, cette probabilité s'écrit comme suit :

$$P(\alpha, \beta) = \int_0^{T_b} dt'_1 f_1(t'_1) \int_{t'_1}^{T_b} dt'_2 f_2(t'_2 - t'_1) \dots \int_{t'_{\alpha-1}}^{T_b} dt'_\alpha f_\alpha(t'_\alpha - t'_{\alpha-1}) \quad (5.13)$$

$$f_{\alpha+1}(t_1 - t'_\alpha) \dots f_{\alpha+\beta}(t_\beta - t_{\beta-1}) F_{\alpha+\beta+1}(T_a - t_\beta) dt_1 \dots dt_\beta$$

Les bris durant la période **non-archivée** ont lieu selon la séquence de temps arbitraires $\{t'_1, t'_2, \dots, t'_\alpha\}$. Puisque ces temps sont inconnus, la probabilité d'occurrence du premier bris non-archivé est égale à l'intégrale de la fonction de densité de probabilité entre le temps d'installation du tronçon, $t = 0$, et le début de l'archivage systématique des bris, T_b . Les intégrales de l'équation permettent de calculer la probabilité de bris pour chacun des ordres de bris de la période non-archivée. Évidemment, la séquence de bris doit respecter la contrainte $0 \leq t'_1 \leq t'_2 \leq t'_3 \dots \leq t'_\alpha$.

La probabilité d'occurrence du premier bris **archivé** est égale à la fonction de densité de probabilité correspondant à l'ordre de bris (le premier ordre de bris archivé est $\alpha + 1$). Les fonctions de densité de probabilité de l'équation permettent de calculer la probabilité de bris pour chacun des ordres de bris de la période archivée, jusqu'au dernier bris archivé qui est d'ordre $(\alpha + \beta)$. La fonction de survie, en dernière partie de l'équation, permet de calculer la probabilité de **ne pas** avoir un $(\alpha + \beta + 1)$ bris entre

le temps d'occurrence du dernier bris, t_β , et le temps d'analyse, T_a . Cette expression, quoique difficile à résoudre sous sa forme générale, se simplifie dans des cas particuliers, tel que celui présenté à la prochaine section.

Une fois que la probabilité $P(\alpha, \beta)$ est estimée pour chaque tronçon i , nous pouvons calculer la probabilité $P'(\beta)$, qui correspond à la probabilité d'observer la séquence de bris $\{t_j\} = t_1, t_2, \dots, t_\beta$ durant la période archivée, peu importe combien et quand les bris ont eu lieu durant la période non-archivée. En terme de $P(\alpha, \beta)$, cette probabilité est définie par :

$$P'(\beta) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} P(\alpha, \beta) = P(0, \beta) + \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha, \beta) \quad (5.14)$$

Pour chaque tronçon i , nous connaissons le nombre de bris pendant la période archivée, β_i , les temps d'occurrence de ces bris, $\{t_j\}_i$, le temps correspondant au début de l'archivage systématique des bris, T_{bi} , et le temps d'analyse, T_{ai} . La probabilité $P'_i(\beta_i)$ peut donc être calculée. La fonction de vraisemblance, $L(\{\gamma_k\})$, présentée à l'Équation 5.15, dépend de k paramètres de calage, γ_k , et est construite en effectuant le produit pour chaque tronçon du réseau d'aqueduc.

$$L(\{\gamma_k\}) = \prod_i P'_i(\beta_i) \quad (5.15)$$

Les valeurs des paramètres de calage, p_k , sont obtenues en maximisant la fonction de vraisemblance. Le nombre de paramètres, k , et la complexité de la fonction de vraisemblance dépendent des distributions associées à chaque ordre de bris et du nombre d'ordres de bris considéré. La prochaine section présente le développement de cette méthodologie pour le modèle Weibull-exp.

5.2.2 Illustration de la méthodologie de calage pour le modèle Weibull-exp.

Premièrement, nous calculons la probabilité $P(\alpha, 0)$, qui correspond à la probabilité pour un tronçon i de briser α fois durant la période non-archivée et de ne pas briser ($\beta = 0$) durant la période archivée. De l'expression générale présentée à l'Équation 5.13 et en considérant le modèle Weibull-exp., la probabilité de ne pas briser durant la période non-archivée et de ne pas briser durant la période archivée, $P(0, 0)$, s'écrit :

$$P(0, 0) = F_1(T_a) = \exp[-(\kappa T_a)^p] \quad (5.16)$$

La probabilité de briser une fois durant la période non-archivée et de ne pas briser durant la période archivée, $P(1, 0)$, est présentée à l'Équation 5.17 :

$$\begin{aligned} P(1, 0) &= \int_0^{T_b} dt'_1 f_1(t'_1) F_2(T_a - t'_1) \\ &= p \kappa^p \int_0^{T_b} dt'_1 t_1'^{p-1} \exp[-(\kappa t_1')^p] \exp[-\kappa_2 (T_a - t_1')] \end{aligned} \quad (5.17)$$

De même, la probabilité de briser deux fois durant la période non-archivée et de ne pas briser durant la période archivée, $P(2, 0)$, s'écrit :

$$\begin{aligned} P(2, 0) &= \int_0^{T_b} dt'_1 f_1(t'_1) \int_{t'_1}^{T_b} dt'_2 f_2(t'_2 - t'_1) F_2(T_a - t'_2) \\ &= p \kappa^p \kappa_2 \int_0^{T_b} dt'_1 t_1'^{p-1} \exp[-(\kappa t_1')^p] \\ &\quad \exp[-\kappa_2 (T_a - t_1')] (T_b - t_1') \end{aligned} \quad (5.18)$$

Enfin, l'Équation 5.19 présente l'expression pour $P(3,0)$:

$$\begin{aligned}
 P(3,0) &= \int_0^{T_b} dt'_1 f_1(t'_1) \int_{t'_1}^{T_b} dt'_2 f_2(t'_2 - t'_1) \int_{t'_2}^{T_b} dt'_3 f_2(t'_3 - t'_2) F_2(T_a - t'_3) \\
 &= p \kappa^p \kappa_2^2 \int_0^{T_b} dt'_1 t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t'_1)^p] \\
 &\quad \exp[-\kappa_2(T_a - t'_1)] \frac{[(T_b - t'_1)^2]}{2}
 \end{aligned} \tag{5.19}$$

Nous pouvons démontrer que l'expression générale pour $P(\alpha,0)$ lorsque $\alpha \geq 1$ est la suivante :

$$\begin{aligned}
 P(\alpha,0) &= p \kappa^p \kappa_2^{\alpha-1} \int_0^{T_b} dt'_1 t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t'_1)^p] \\
 &\quad \exp[-\kappa_2(T_a - t'_1)] \frac{[(T_b - t'_1)^{\alpha-1}]}{(\alpha-1)!}
 \end{aligned} \tag{5.20}$$

Deuxièmement, nous calculons la probabilité $P(0, \beta)$, qui correspond à la probabilité pour un tronçon i de ne pas briser ($\alpha = 0$) durant la période non-archivée et de briser β fois durant la période archivée. De l'expression générale présentée à l'Équation 5.13 et en considérant le modèle Weibull-exp., la probabilité de ne pas briser durant la période non-archivée et de briser une fois durant la période archivée, $P(0, 1)$, est définie par :

$$\begin{aligned}
 P(0,1) &= f_1(t_1) F_2(T_a - t_1) \\
 &= p \kappa^p t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t_1)]
 \end{aligned} \tag{5.21}$$

Pour la probabilité de ne pas briser durant la période non-archivée et de briser deux fois durant la période archivée $P(0, 2)$, nous obtenons :

$$\begin{aligned} P(0,2) &= f_1(t_1) f_2(t_2 - t_1) F_2(T_a - t_2) \\ &= \kappa_2 p \kappa^p t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t_1)] \end{aligned} \quad (5.22)$$

Plus généralement, nous pouvons démontrer que pour $\beta \geq 1$:

$$P(0, \beta) = \kappa_2^{\beta-1} P(0,1) \quad (5.23)$$

Maintenant, la probabilité de briser une fois durant la période non-archivée et de briser une fois durant la période archivée $P(1,1)$, s'écrit :

$$\begin{aligned} P(1,1) &= \int_0^{T_b} dt'_1 f_1(t'_1) f_2(t_1 - t'_1) F_2(T_a - t_1) \\ &= \kappa_2 p \kappa^p \int_0^{T_b} dt'_1 t_1'^{p-1} \exp[-(\kappa t_1')^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t_1')] \end{aligned} \quad (5.24)$$

Nous remarquons que :

$$P(1,1) = \kappa_2 P(1,0) \quad (5.25)$$

En fait, de façon générale, nous pouvons démontrer que, pour $\alpha \geq 1$:

$$P(\alpha, \beta) = \kappa_2^\beta P(\alpha, 0) \quad (5.26)$$

Cette dernière équation nous montre que lorsqu'un bris a lieu durant la période non-archivée, la probabilité d'observer des bris durant la période archivée ne dépend pas du temps d'occurrence des bris archivés mais bien du nombre de bris archivés. Ceci tient à la nature de la distribution exponentielle utilisé pour décrire les bris subséquents.

Sachant que le but de cet exercice est de développer l'expression pour la fonction de vraisemblance (Équation 5.15) pour le modèle Weibull-exp., en reprenant l'Équation 5.14 pour $\beta = 0$, nous obtenons :

$$P'(0) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} P(\alpha,0) = P(0,0) + \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha,0) \quad (5.27)$$

En développant la sommation du dernier terme de l'Équation 5.27, nous pouvons montrer grâce à la série de Taylor que :

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha,0) &= p \kappa^p \int_0^{T_b} dt'_1 t'^{p-1}_1 \exp[-(\kappa t'_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t'_1)] \\ &\quad \sum_{\alpha=1}^{\infty} \kappa_2^{\alpha-1} \frac{[(T_b - t'_1)^{\alpha-1}]}{(\alpha-1)!} \\ &= p \kappa^p \int_0^{T_b} dt'_1 t'^{p-1}_1 \exp[-(\kappa t'_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t'_1)] \\ &\quad \exp[\kappa_2(T_b - t'_1)] \end{aligned} \quad (5.28)$$

En regroupant les deux termes exponentiels qui sont en dehors de l'intégrale dans l'Équation 5.28, nous constatons que les termes qui restent (entre accolades dans l'Équation 5.29) sont le développement de l'intégrale de la fonction de densité de probabilité pour le premier bris non-archivé. En utilisant l'interdépendance des fonctions de densité de probabilité et de survie, telle qu'illustrée à l'Équation 5.3, et en développant la fonction de survie pour le modèle Weibull-exp., nous obtenons :

$$\begin{aligned} \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha,0) &= \exp[-\kappa_2(T_a - T_b)] \left\{ p \kappa^p \int_0^{T_b} dt'_1 t_1'^{p-1} \exp[-(\kappa t'_1)^p] \right\} \\ &= \exp[-\kappa_2(T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa T_b)^p]\} \end{aligned} \quad (5.29)$$

Substituant cette dernière expression dans l'Équation 5.27, nous obtenons :

$$\begin{aligned} P'(0) &= \exp[-(\kappa T_a)^p] + \\ &\quad \exp[-\kappa_2(T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa T_b)^p]\} \end{aligned} \quad (5.30)$$

La probabilité $P'(1)$ se calcule aussi à partir de l'Équation 5.14, en développant le premier terme à l'aide de l'Équation 5.21, et le second terme à l'aide des Équations 5.26 et 5.29, nous obtenons :

$$\begin{aligned} P'(1) &= P(0,1) + \kappa_2 \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha,0) \\ &= p \kappa^p t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t_1)] + \\ &\quad \kappa_2 \exp[-\kappa_2(T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa T_b)^p]\} \end{aligned} \quad (5.31)$$

Plus généralement, à partir de l'Équation 5.14, en développant le premier terme à l'aide des Équations 5.23 et 5.21, et le second terme à l'aide des Équations 5.26 et 5.29, nous obtenons pour $P'(\beta)$:

$$\begin{aligned} P'(\beta) &= \kappa_2^{\beta-1} P(0,1) + \kappa_2^\beta \sum_{\alpha=1}^{\infty} P(\alpha,0) \\ &= \kappa_2^{\beta-1} p \kappa^p t_1^{p-1} \exp[-(\kappa t_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - t_1)] + \\ &\quad \kappa_2^\beta \exp[-\kappa_2(T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa T_b)^p]\} \end{aligned} \quad (5.32)$$

Il est intéressant de noter que si l'on pose $T_b = 0$ dans les expressions 5.30 et 5.32, on retrouve les expressions associées aux fonctions de base. Finalement, la fonction de vraisemblance (Équation 5.15) s'écrit :

$$L(\kappa, p, \kappa_2) = \prod_{i \Leftrightarrow \beta=0} P_i'(0) \prod_{i \Leftrightarrow \beta \geq 1} P_i'(\beta_i) \quad (5.33)$$

Le premier produit de l'Équation 5.33 porte sur les tronçons i n'ayant jamais brisé ($\beta = 0$) et se calcule tel que présenté à l'Équation 5.30. Le second produit porte sur les tronçons i ayant brisé au moins une fois ($\beta \geq 1$) et se calcule tel que présenté à l'Équation 5.32. Il est à noter que les variables T_b , T_a et t_i varient pour chacun des tronçons et que $T_b = 0$ pour les tronçons installés durant la période archivée.

Donc, en substituant l'Équation 5.30 pour le premier produit et l'Équation 5.32 pour le second, et en prenant le logarithme naturel pour transformer le produit en somme, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \ln L(\kappa, p, \kappa_2) = & \\ & \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i=0} \ln \{ \exp[-(\kappa T_{ai})^p] + \exp[-\kappa_2(T_{ai} - T_{bi})] \{1 - \exp[-(\kappa T_{bi})^p]\} \} \\ & + \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i \geq 1} \ln \{ \kappa_2^{\beta_i-1} \{ p \kappa^p t_{li}^{p-1} \exp[-(\kappa t_{li})^p] \exp[-\kappa_2(T_{ai} - t_{li})] + \\ & \quad \kappa_2 \exp[-\kappa_2(T_{ai} - T_{bi})] \{1 - \exp[-(\kappa T_{bi})^p]\} \} \} \end{aligned} \quad (5.34)$$

Puisque nous prenons le logarithme naturel du terme $\kappa_2^{\beta_i-1}$ multiplié au terme entre accolades, ce produit peut être transformé en somme, ce qui se traduit par l'expression suivante (β_{Dernier} représentant le plus grand nombre de bris répertoriés sur un tronçon) :

$$\sum_{i \Leftrightarrow \beta_i \geq 1} \ln \kappa_2^{\beta_i-1} = \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i=1} \ln 1 + \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i=2} \ln \kappa_2 + \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i=3} \ln \kappa_2^2 + \dots + \sum_{i \Leftrightarrow \beta_i=\beta_{\text{Dernier}}} \ln \kappa_2^{\beta_{\text{Dernier}}-1} \quad (5.35)$$

Le premier terme de l'équation 5.35 se réduit à 0 et, en posant qu'il y a X_β tronçons qui ont subi β bris, nous obtenons :

$$\sum_{i \leftrightarrow \beta_i \geq 1} \ln \kappa_2^{\beta_i - 1} = (X_2 + 2X_3 + 3X_4 + \dots + \beta_{\text{Dernier}-1} X_{\beta_{\text{Dernier}}}) \ln \kappa_2 \quad (5.36)$$

Le nombre total de tronçons sur le réseau, X_{Total} , et le nombre total de bris sur le réseau, N_{Total} , sont donnés aux Équations 5.37 et 5.38.

$$X_{\text{Total}} = X_0 + X_1 + X_2 + \dots + X_{\beta_{\text{Dernier}}} \quad (5.37)$$

$$N_{\text{Total}} = X_1 + 2X_2 + 3X_3 + \dots + \beta_{\text{Dernier}} X_{\beta_{\text{Dernier}}} \quad (5.38)$$

En posant $N_x = N_{\text{Total}} + X_0 - X_{\text{Total}}$, nous remarquons que cela définit le terme entre parenthèses dans l'Équation 5.36. Nous pouvons donc réécrire l'Équation 5.34 comme suit :

$$\begin{aligned} \ln L(\kappa, p, \kappa_2) = & \\ & \sum_{i \leftrightarrow \beta_i = 0} \ln \{ \exp[-(\kappa T_{ai})^p] + \exp[-\kappa_2(T_{ai} - T_{bi})] \{ 1 - \exp[-(\kappa T_{bi})^p] \} \} \\ & + \sum_{i \leftrightarrow \beta_i \geq 1} \ln \{ p \kappa^p t_{li}^{p-1} \exp[-(\kappa t_{li})^p] \exp[-\kappa_2(T_{ai} - t_{li})] + \\ & \kappa_2 \exp[-\kappa_2(T_{ai} - T_{bi})] \{ 1 - \exp[-(\kappa T_{bi})^p] \} \} + N_x \ln \kappa_2 \end{aligned} \quad (5.39)$$

Les valeurs optimales des paramètres de calage κ , p et κ_2 maximiseront la fonction de vraisemblance. Ces valeurs optimales, une fois utilisées par le modèle, permettront de modéliser l'évolution du nombre moyen annuel de bris sur le réseau. Il ne nous a pas été possible de développer une expression analytique nous permettant d'obtenir les valeurs optimales des paramètres de calage, alors une méthode numérique d'optimisation, l'algorithme de Powell (Press et al., 1988), a été utilisée. Le Tableau 5.1 présente la

structure de la table contenant les données d'entrée. Cette table doit contenir une ligne pour chacun des tronçons installés et pour chacun des tronçons remplacés. Dans le cas d'un tronçon qui est remplacé, le temps d'analyse, T_a , est égal au temps de remplacement. Dans le cas du nouveau tronçon qui remplace l'ancien, le temps d'installation $t=0$ commence au temps de remplacement.

Tableau 5.1 Structure de la table des données d'entrée pour maximiser la fonction de vraisemblance

Numéro de tronçon	Année d'installation ($t=0$)	Nombre de bris durant la période archivée	Année du premier bris archivé	Temps (en années) entre l'installation et l'archivage des bris (T_b)*	Temps (en années) entre l'installation et l'analyse (T_a)*	Temps (en années) entre l'installation et le premier bris archivé (t_1)
1	1950	3	1990	30	49	40
2	1972	2	1988	8	27	16
3	1988	0	-	0	11	-
...

*Note : À titre d'exemple, l'année de début d'archivage des bris est 1980 et l'année d'analyse est 1999.

5.3 Développement de l'expression du modèle

L'expression 5.39 nous permet donc d'estimer les valeurs des paramètres des distributions les plus probables pour un échantillon de tronçons donné. L'indicateur retenu pour décrire l'état structural d'un réseau étant le nombre annuel de bris, il nous faut trouver l'expression de cet indicateur en fonction du modèle proposé. Nous présentons dans ce qui suit le développement de cette expression dans le cadre du modèle Weibull-exp. On considère N tronçons installés au temps $t=0$. Une fraction $N [F_I(T_b)]$ NE brisera PAS durant l'intervalle $[0, T_b]$, alors qu'une fraction $N [1-F_I(T_b)]$ brisera AU MOINS UNE FOIS. Considérons premièrement le groupe de tronçons n'ayant pas brisé au temps T_b , le nombre de tronçons qui brisera n fois durant l'intervalle $[T_b, T_a]$ est donné par :

$$N \frac{f_1(t_1) f_2(t_2 - t_1) f_2(t_3 - t_2) \dots f_2(t_n - t_{n-1})}{F_2(T_a - t_n)} dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (5.40)$$

En utilisant les fonctions de densité de probabilité et de survie associées à la distribution exponentielle pour les bris subséquents, l'Équation 5.40 devient :

$$N \kappa_2^{n-1} f_1(t_1) \exp[-\kappa_2(T_a - t_1)] dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (5.41)$$

Considérons maintenant le groupe de tronçons ayant brisé au moins une fois durant l'intervalle $[0, T_b]$, le nombre de tronçons qui brisera n fois durant l'intervalle $[T_b, T_a]$ est donné par :

$$N \frac{[1 - F_1(T_b)] f_2(t_1 - T_b) f_2(t_2 - t_1) \dots f_2(t_n - t_{n-1})}{F_2(T_a - t_n)} dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (5.42)$$

En utilisant toujours les fonctions de densité de probabilité et de survie associées à la distribution exponentielle pour les bris subséquents, cette expression devient :

$$N [1 - F_1(T_b)] \kappa_2^n \exp[\kappa_2(T_b - T_a)] dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (5.43)$$

En regroupant les deux termes exprimés aux Équations 5.41 et 5.43, la probabilité $P(n; \{t_1, t_2, \dots, t_n\})$ qu'un tronçon brise n fois durant l'intervalle $[T_b, T_a]$ aux temps $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ est donnée par :

$$P(n; \{t_1, t_2, \dots, t_n\}) dt_1 dt_2 \dots dt_n = \kappa_2^{n-1} \exp[-\kappa_2 T_a] \left\{ f_1(t_1) \exp(\kappa_2 t_1) + \kappa_2 [1 - F_1(T_b)] \exp(\kappa_2 T_b) \right\} dt_1 dt_2 \dots dt_n \quad (5.44)$$

Maintenant, la probabilité $P(n)$ qu'un tronçon brise n fois durant l'intervalle $[T_b, T_a]$ sans égard aux temps où ces bris surviennent est donnée par :

$$P(n) = \int_{T_b}^{T_a} dt_1 \int_{t_1}^{T_a} dt_2 \dots \int_{t_{n-1}}^{T_a} dt_n P(n; \{t_1, t_2, \dots, t_n\}) \quad (5.45)$$

Puisque la probabilité $P(n; \{t_1, t_2, \dots, t_n\})$ ne dépend que de t_1 , l'intégration par rapport aux autres variables est simple et nous obtenons :

$$P(n) = \int_{T_b}^{T_a} dt_1 P(n; \{t_1\}) \frac{(T_a - t_1)^{n-1}}{(n-1)!} \quad (5.46)$$

Le nombre moyen de bris par tronçon durant l'intervalle $[T_b, T_a]$ est alors donné par :

$$\bar{n}(T_b, T_a) = \sum_{n=1}^{\infty} n P(n) \quad (5.47)$$

En substituant l'expression pour $P(n)$ dans cette équation et après simplification, nous obtenons :

$$\begin{aligned} \bar{n}(T_b, T_a) = & \sum_{n=1}^{\infty} n \kappa_2^{n-1} \exp(-\kappa_2 T_a) \int_{T_b}^{T_a} dt_1 \frac{(T_a - t_1)^{n-1}}{(n-1)!} f_1(t_1) \exp(\kappa_2 t_1) \\ & + \kappa_2 (T_a - T_b) [1 - F_1(T_b)] \end{aligned} \quad (5.48)$$

De plus, nous pouvons montrer que :

$$\sum_{n=1}^{\infty} n \frac{[\kappa_2 (T_a - t_1)]^{n-1}}{(n-1)!} = [\kappa_2 (T_a - t_1) + 1] \exp[\kappa_2 (T_a - t_1)] \quad (5.49)$$

Et finalement, en substituant cette expression dans l'équation précédente, nous obtenons :

$$\bar{n}(T_b, T_a) = [F_1(T_b) - F_1(T_a)] + \kappa_2 \left\{ T_a [1 - F_1(T_a)] - T_b [1 - F_1(T_b)] - \int_{T_b}^{T_a} dt_1 t_1 f_1(t_1) \right\} \quad (5.50)$$

Cette expression donne le nombre de bris moyen observé sur un tronçon durant l'intervalle $[T_b, T_a]$. Si l'on pose $T_a = T_b + I$, on aura le nombre annuel moyen de bris pour l'année débutant en T_b pour le tronçon en question. Pour l'ensemble du réseau, le nombre de bris moyen pour l'année A est donné par :

$$\bar{n}(A) = \sum_{i=1}^{X_{Total}} \bar{n}(T_{b_i}, T_{b_i} + 1) \quad (5.51)$$

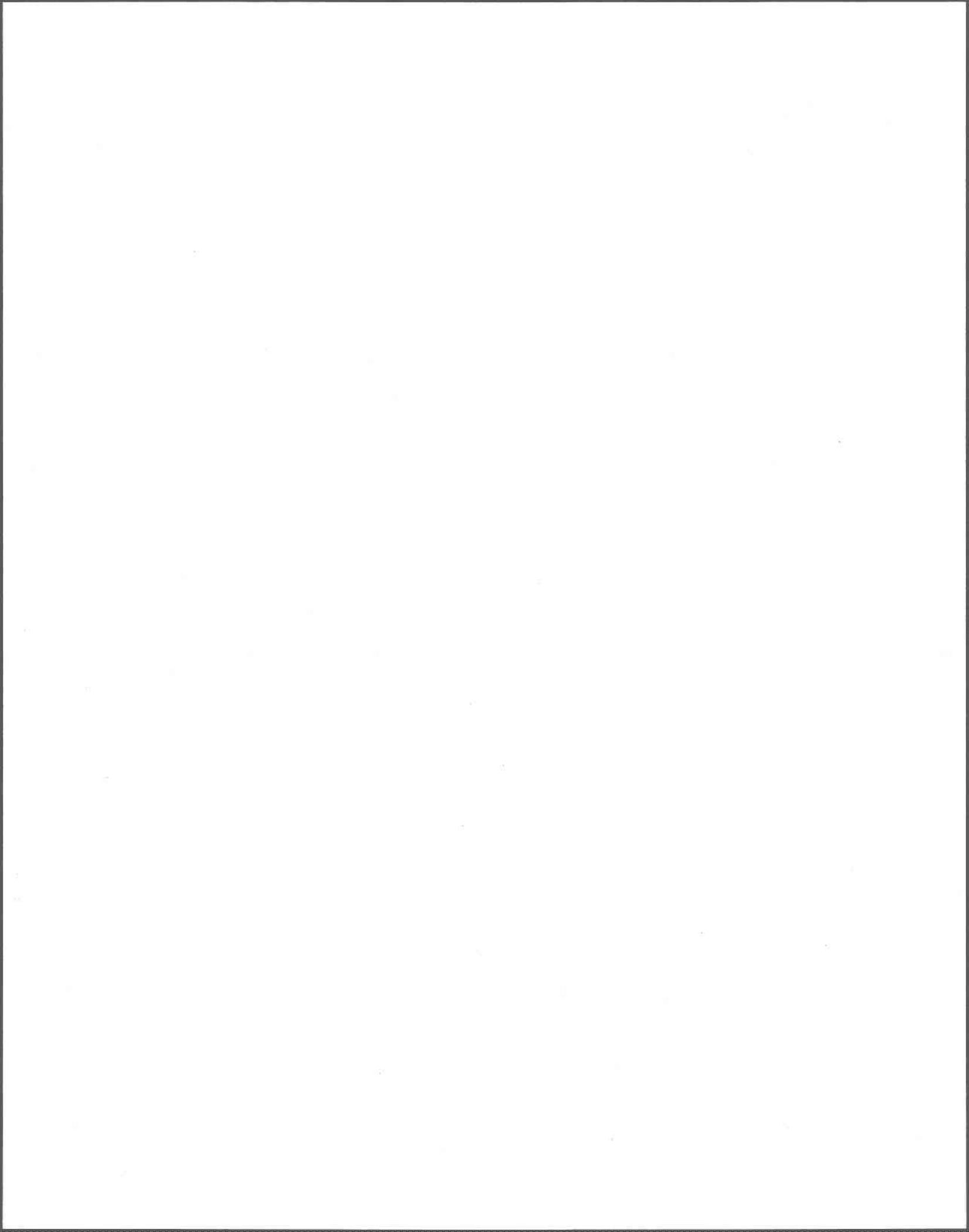
En déplaçant la fenêtre d'observation de $[T_b, T_b + I]$ à $[T_b + 1, T_b + 2]$, puis à $[T_b + 2, T_b + 3]$, etc., et ce, pour chaque tronçon, il est possible de calculer l'historique de bris du réseau pour une période donnée.

5.4 Synthèse

Le modèle proposé pour modéliser l'état structural des conduites d'aqueduc est basé sur l'analyse de survie. Afin de tenir compte de l'influence du nombre de bris antérieurs, les temps de survie ont été modélisés par deux distributions, soit une distribution de Weibull pour les premiers bris et une distribution exponentielle pour les bris subséquents. Ces distributions sont définies par trois fonctions interdépendantes : les fonctions de risque, de survie et de densité de probabilité. La distribution de Weibull est une distribution à deux paramètres, p et κ . Lorsque p est plus grand que 1, le risque croît avec

le temps, ce qui est le comportement attendu en terme de bris de conduites. La distribution exponentielle (un seul paramètre, κ_2) est caractérisée par un risque indépendant du temps, ce qui se traduit par le fait qu'une proportion constante des conduites ayant brisé rebriseront. Par exemple, si 10% de 1000 conduites brisent une année, alors 10% des 100 conduites qui ont brisé l'année précédente rebriseront cette année, et ainsi de suite. Cela reflète bien ce qui est généralement observé sur les réseaux pour les bris d'ordre élevé. Le modèle proposé est nommé : Weibull-exp. ou W-E. L'expression mathématique de ce modèle est présentée à l'Équation 5.50.

La stratégie de calage est basée sur la maximisation de la fonction de vraisemblance afin d'estimer les valeurs des trois paramètres du modèle Weibull-exp. Le défi consiste principalement à définir l'expression pour la fonction de vraisemblance en tenant compte du fait que nous ne savons pas combien, ni quand ont eu lieu les bris durant la période non-archivée. À ce titre, l'approche proposée est une extension de l'analyse de survie "classique" permettant l'analyse et la modélisation des données de municipalités qui autrement ne pourraient être considérées. L'Équation 5.39 présente le résultat obtenu pour le modèle Weibull-exp. Bien que décrite dans le cadre d'un modèle précis, cette approche peut être appliquée quelque soit le modèle, ainsi, l'Appendice C présente les équations d'autres modèles définis au chapitre suivant (W-E-E, W-W-E et W-W-E-E).



6 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ce chapitre présente tout d'abord, sous forme de tableaux, les résultats de calage obtenus pour les quatre cas d'application par maximisation de la fonction de vraisemblance présentée au chapitre précédent (Équation 5.37). Les analyses ayant mené à la prise en compte du facteur de risque lié à l'installation des conduites avant et après 1960 dans les municipalités A et C sont aussi présentées. Tel que mentionné précédemment, nous nous attendons à obtenir des valeurs plus grandes que 1 pour le paramètre p associé à la distribution de Weibull (premiers bris). À titre indicatif, mentionnons que les valeurs obtenues par Eisenbeis (1994) pour le paramètre κ associé à la distribution de Weibull était dans la plage 0.02 à 0.03 pour la strate des premiers bris et le paramètre κ_2 associé à la distribution exponentielle était dans la plage 0.15 à 0.20 pour la strate des bris subséquents (qui correspondait aux cinquième bris et plus dans cette étude).

La deuxième section présente les résultats de modélisation obtenus en injectant les valeurs optimales des paramètres de calage pour chacun des cas d'application dans l'expression présentée à l'Équation 5.50 du chapitre précédent, donnant le nombre moyen de bris sur le réseau. Des graphiques présentant les résultats de modélisation et le nombre annuel de bris observés permettent de juger de la capacité du modèle à reproduire adéquatement et de façon satisfaisante la tendance générale du nombre annuel de bris sur le réseau. De plus, les résultats obtenus suite à la prise en compte du facteur de risque lié à l'installation des conduites avant et après 1960 dans les municipalités A et C permettent d'apprécier l'influence de ce facteur sur la modélisation. Cette section présente aussi une brève analyse de l'impact de la durée de la période archivée sur les résultats de modélisation, compte tenu que les incertitudes sur les valeurs des paramètres augmenteront au fur et à mesure que la durée de la période d'archivage diminuera.

La troisième section présente les résultats obtenus pour différents scénarios de remplacement de conduites sur un horizon de 20 ans. Les tronçons sélectionnés pour être remplacés sont choisis de façon aléatoire parmi les tronçons ayant subi au moins un bris. Dans le cas des municipalités A et C, une seconde stratégie de remplacement a été utilisée, c'est-à-dire en sélectionnant en priorité les tronçons installés après 1960. De plus, pour chacune des municipalités, nous avons estimé le taux de remplacement annuel nécessaire afin de maintenir le nombre de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996.

Finalement, la dernière section invite le lecteur à consulter l'Appendice C (Analyse complémentaire réalisée avec différents modèles) qui présente les résultats de calage obtenus avec les données de la municipalité A pour différents modèles, ainsi que les expressions de la fonction de vraisemblance associée à chacun des modèles présentés.

6.1 Résultats de calage

Les valeurs optimales des paramètres de calage sont obtenues en maximisant la fonction de vraisemblance. Il est à noter que les données du fichier d'entrée (leur structure est présentée au Tableau 5.1) du programme développé pour le calage contiennent l'historique de bris pour tous les tronçons du réseau durant la période archivée, mais, évidemment, seuls les bris ayant pu être associés au tronçon sur lequel ils ont eu lieu s'y trouvent. Tel que mentionné à la fin du Chapitre 3, ces bris représentent 75% de tous les bris archivés dans la municipalité A, 83% dans la municipalité B, 85% dans la municipalité C et 94% dans la municipalité D. Il est clair qu'une perte d'information est associée au fait que tous les bris archivés ne peuvent être utilisés pour le calage. Cette perte est encore plus significative pour les municipalités à courts historiques de bris. En pratique, c'est une réalité incontournable lorsque nous voulons travailler avec des données réelles (par opposition à des données synthétiques). Lors de la modélisation, le nombre annuel moyen de bris obtenu par le modèle est comparé au nombre annuel total observé (*i.e.* bris liés et non-liés) durant la période archivée, puisque c'est le total des bris qui représente le comportement réel des tronçons dans chaque municipalité. Puisque le calage s'effectue en ne considérant que les bris liés, cette comparaison du nombre annuel moyen de bris peut, somme toute, être un indicateur de la représentativité statistique des tronçons liés. On pourrait, par exemple, imaginer un cas où les bris non-liés seraient tous survenus sur des tronçons ayant subi plusieurs bris, dans quel cas l'estimation des paramètres serait biaisée et la courbe du nombre annuel de bris ne passerait pas nécessairement parmi les données observées. L'algorithme de Powell est utilisé pour trouver les valeurs des paramètres. Comme cet algorithme ne garantit pas la convergence vers un minimum global de la fonction, nous avons utilisé plusieurs jeux de paramètres initiaux afin de nous assurer que le minimum trouvé correspond à un minimum global de la fonction.

Bien que la stratégie de calage soit adaptée aux municipalités à court historique de bris, il est clair que la durée de la période archivée par rapport à l'historique complet du réseau a une forte influence sur les

valeurs des paramètres de calage trouvées. En effet, si la durée de la période archivée est trop courte (à la limite, imaginons un an), il serait très étonnant de bien reproduire le nombre annuel moyen de bris observés dans une municipalité avec les valeurs des paramètres de calage obtenues. De plus, il est important que le comportement en terme de bris durant la période archivée soit représentatif du vieillissement du réseau. Par exemple, une durée de période archivée couvrant l'historique complet d'un réseau dont les premiers tronçons n'ont été posés qu'il y a 5 ans, générera des valeurs de paramètres de calage qui ne permettront pas vraisemblablement de prédire le comportement de ce réseau dans 20 ans. En fait, on peut penser que plus la période archivée est grande, plus il est probable que l'échantillon de bris soit suffisant pour générer des valeurs de paramètres de calage statistiquement significatifs. Si la durée de la période d'archivage diminue, l'incertitude sur les valeurs des paramètres augmentera.

6.1.1 Municipalité A

Le Tableau 6.1 présente les valeurs optimales des paramètres de calage pour différentes périodes d'installation pour la municipalité A. Le nombre de tronçons présenté dans ce tableau comprend les nouveaux tronçons et ceux remplacés. La période d'installation [1976, 1996] coïncide avec la période d'archivage des bris, *i.e.* pendant laquelle l'historique des bris est entièrement connu pour tous les tronçons, et donc, pour laquelle l'analyse de survie "classique" peut être utilisée. Il est à noter que la période d'archivage des bris (21 ans) correspond à 19.8% de l'historique complet du réseau (106 ans). Les valeurs des paramètres de calage pour la période [1976, 1996] ont été calculées à l'aide d'un logiciel commercial ayant des fonctionnalités d'analyse de survie (*e. g.* STATISTICA^{MD}) et ont servi à vérifier celles obtenues par le programme FORTRAN^{MD} développé pour la stratégie de calage proposée. Ce tableau montre que les valeurs des paramètres de calage varient sensiblement entre les différentes périodes d'installation. Il existe donc un facteur de risque associé à la période d'installation ou dépendant du temps, tels le type de matériau ou la technique d'installation, qui a une forte influence sur le taux de bris. On observe que l'introduction des tronçons installés dans les années 1960 ([1965, 1996] et [1960, 1996]) a une grande influence sur la valeur des paramètres.

Tableau 6.1 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité A

Périodes d'installation	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	L(p, κ , κ_2)
[1976, 1996]	724	1.163	0.017	0.167	914.3
[1970, 1996]	1079	1.213	0.018	0.148	1898.8
[1965, 1996]	1289	1.399	0.024	0.181	3277.9
[1960, 1996]	1556	1.476	0.025	0.205	5002.5
[1949, 1996]	2230	1.246	0.018	0.161	7143.1
[1891, 1996]	2449	1.062	0.015	0.147	7817.0

Les fonctions de survie de la distribution Weibull associée aux premiers bris sont présentées à la Figure 6.1. Cette figure montre que l'introduction des tronçons installés durant les années 60 fait baisser la fonction de survie, *i.e.* ces groupes de tronçons ([1965, 1996] et [1960, 1996]) subissent leur premier bris plus rapidement que les autres tronçons installés antérieurement. L'examen des valeurs du paramètre κ_2 associé à la distribution exponentielle présentées au Tableau 6.1 (qui est équivalent à la fonction de risque de cette distribution) nous indique que les tronçons installés durant les années 60 brisent aussi plus souvent subséquemment. Il n'est pas possible de connaître la cause exacte de ce comportement mais il n'est pas lié à l'introduction de la fonte ductile puisqu'elle a eu lieu au début des années 1970. Afin de tenir compte de cette réalité pour la municipalité A, le modèle retenu est le modèle Weibull-exp. mais comportant, toutefois, deux jeux de paramètres. Un premier est obtenu à partir des données provenant du groupe de tronçons installés avant 1960 (nommé A1) et un second, à partir du groupe de tronçons installés pendant et après 1960 (A2).

Le Tableau 6.2 présente les valeurs des paramètres de calage obtenues pour ces deux groupes de tronçons ainsi que celles obtenues précédemment, pour la période couvrant tout l'historique du réseau, [1891, 1996]. On observe que les valeurs de paramètres sont significativement différentes pour les trois cas présentés et que le risque de bris subséquents pour le groupe A2 est très élevé.

Tableau 6.2 Valeurs des paramètres de calage par groupe de tronçons pour la période [1891-1996] pour la municipalité A

Groupe de tronçons	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	$L(p, \kappa, \kappa_2)$
A1	893	1.262	0.013	0.076	2613.8
A2	1556	1.476	0.025	0.205	5002.5
A	2449	1.062	0.015	0.147	7817.0

6.1.2 Municipalité B

Le Tableau 6.3 présente les valeurs optimales des paramètres de calage obtenues en maximisant la fonction de vraisemblance pour différentes périodes d'installation pour la municipalité B. La période d'installation [1990, 1996] coïncide avec la période d'archivage des bris. L'historique de bris très court (7 ans) correspond à 8.1% de l'historique complet du réseau (86 ans). C'est le plus petit pourcentage des quatre municipalités. La valeur du paramètre p inférieure à 1 pour la période d'installation couvrant l'historique complet du réseau indique que le risque de briser pour la première fois diminuerait avec le temps. Cette observation va à l'encontre de ce que nous serions à même de nous attendre. L'analyse plus poussée de ces résultats est présentée à la section sur les résultats de modélisation.

Tableau 6.3 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité B

Périodes d'installation	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	$L(p, \kappa, \kappa_2)$
[1990, 1996]	138	1.360	0.031	0.172	64.7
[1980, 1996]	457	0.863	0.007	0.106	241.0
[1970, 1996]	902	0.845	0.006	0.115	553.0
[1960, 1996]	1136	1.031	0.010	0.146	903.0
[1940, 1996]	1836	0.995	0.009	0.156	1934.2
[1911, 1996]	2033	0.817	0.006	0.147	2121.5

6.1.3 Municipalité C

Le Tableau 6.4 présente les valeurs optimales des paramètres de calage obtenues en maximisant la fonction de vraisemblance pour différentes périodes d'installation pour la municipalité C. La période d'archivage des bris correspond à la période d'installation [1981, 1996]. La période d'archivage des bris (16 ans) correspond à 30.8% de l'historique complet du réseau (52 ans). C'est le plus grand pourcentage des quatre municipalités. Tout comme pour la municipalité A, l'introduction des tronçons installés dans les années 1960 a une forte influence sur les valeurs des paramètres de calage. Le modèle retenu est donc le modèle Weibull-exp. avec deux jeux de paramètres : un pour les tronçons installés avant 1960 (nommé C1), et un second pour les tronçons installés pendant et après 1960 (C2).

Tableau 6.4 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité C

Périodes d'installation	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	L(p, κ , κ_2)
[1981, 1996]	497	0.906	0.006	0.158	225.3
[1970, 1996]	941	1.691	0.023	0.252	1369.4
[1965, 1996]	1045	2.032	0.028	0.249	1973.7
[1960, 1996]	1260	2.172	0.029	0.242	3074.6
[1950, 1996]	1489	1.945	0.026	0.215	4074.4
[1945, 1996]	1563	1.868	0.025	0.213	4486.1

Le Tableau 6.5 présente les valeurs des paramètres de calage obtenues pour ces deux groupes de tronçons ainsi que celles obtenues précédemment, pour la période couvrant tout l'historique du réseau, [1945, 1996]. On observe, comme pour la municipalité A, que les valeurs de paramètres sont significativement différentes pour les trois cas présentés et que le risque de bris subséquents pour le groupe C2 est très élevé.

Tableau 6.5 Valeurs des paramètres de calage par groupe de tronçons pour la période [1945-1996] pour la municipalité C

Groupe de tronçons	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	$L(p, \kappa, \kappa_2)$
C1	303	2.725	0.022	0.177	1383.0
C2	1260	2.172	0.029	0.242	3074.6
C	1563	1.868	0.025	0.213	4486.1

6.1.4 Municipalité D

Le Tableau 6.6 présente les valeurs optimales des paramètres de calage obtenues en maximisant la fonction de vraisemblance pour différentes périodes d'installation pour la municipalité D. L'historique de bris pour cette municipalité est le deuxième plus court à notre disposition, couvrant la période [1987, 1996]. Contrairement à la municipalité B, la période d'archivage des bris (10 ans) couvre un bon pourcentage (20.8%) de l'historique complet du réseau (48 ans). Un grand nombre de tronçons a été installé en 1978, c'est pourquoi la prise en compte de cette année dans la période d'installation a une grande influence sur les valeurs des paramètres de calage. En fait, cette influence est d'autant plus marquée que le nombre de tronçons pris en compte dans les deux périodes excluant l'année 1978 est petit. Contrairement aux résultats obtenus pour les municipalités A et C, il n'a pas été jugé nécessaire de diviser les tronçons selon leur période d'installation pour la modélisation.

Tableau 6.6 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour la municipalité D

Périodes d'installation	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2	L(p, κ , κ_2)
[1987, 1996]	344	1.556	0.016	0.167	58.8
[1982, 1996]	441	1.440	0.010	0.168	76.8
[1978, 1996]	1018	2.351	0.021	0.093	418.2
[1972, 1996]	1260	2.044	0.016	0.084	517.9
[1960, 1996]	1618	2.286	0.019	0.088	1082.5
[1949, 1996]	1811	2.057	0.017	0.073	1304.0

Le Tableau 6.7 présente en résumé les valeurs des paramètres de calage obtenues pour les quatre municipalités pour la période d'installation couvrant tout l'historique de chaque réseau. Sauf pour les résultats obtenus pour la municipalité B (discutés à la prochaine section), nous pouvons conclure que les valeurs obtenues pour tous les paramètres de calage sont dans une plage de valeurs comparables à celles obtenues par Eisenbeis (1994).

Tableau 6.7 Valeurs des paramètres de calage pour les quatre municipalités

Municipalités	Périodes d'installation	Nombre de tronçons	p	κ	κ_2
A1	[1891, 1959]	893	1.262	0.013	0.076
A2	[1960, 1996]	1556	1.476	0.025	0.205
B	[1911, 1996]	2033	0.817	0.006	0.147
C1	[1945, 1959]	303	2.725	0.022	0.177
C2	[1960, 1996]	1260	2.172	0.029	0.242
D	[1949, 1996]	1811	2.057	0.017	0.073

Les Figures 6.2 à 6.4 présentent respectivement les fonctions de survie, de densité de probabilité et de risque de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre municipalités. Les fonctions de survie nous indiquent la proportion de tronçons ayant subi un premier bris au temps t . La Figure 6.2 nous montre que, 25 ans après leur installation, les proportions de tronçons qui n'ont jamais brisé sont plus élevées pour le groupe de tronçons C1 (tronçons installés avant 1960) et pour la municipalité D. Les proportions les moins élevées sont observées pour les groupes de tronçons A2 et C2. Ces tronçons posés pendant et après 1960 dans les municipalités A et C, malgré leur "jeune" âge, brisent donc plus rapidement que tous les autres groupes de tronçons étudiés durant cette période. La proportion de tronçons ayant brisé atteint 50% après 57 ans pour A1, après 32 ans pour A2, après 40 ans pour C1, après 28 ans pour C2, après 49 ans pour la municipalité D et cette proportion n'est jamais atteinte en 100 ans pour B.

La Figure 6.3 présente les densités de probabilité associées aux premiers bris. Les courbes donnent une indication sur la probabilité de subir un premier bris en fonction du temps. Le comportement est différent pour chaque municipalité, bien que la forme de "cloche" asymétrique typique lorsque le paramètre p est supérieur à 1 se retrouve pour chacune, sauf pour la municipalité B (pour laquelle p est inférieur à 1). La plus forte probabilité de briser est atteinte autour de 22 ans pour A1, 20 ans pour A2, immédiatement après la pose pour B, 40 ans pour C1, 25 ans pour C2 et 43 ans pour la municipalité D. Il est clair que le comportement de la municipalité B est difficilement explicable.

La Figure 6.4 présente les fonctions de risque pour les quatre municipalités. À long terme (40 ans et plus), on observe trois types de comportement : un fort risque de briser dans la municipalité C (C1 et C2), un risque moyen pour A2 et D et un risque faible pour A1 et B. Le risque associé aux bris subséquents (le paramètre κ_2 dans le Tableau 6.7) est élevé pour les groupes de conduites C2 et A2, moins élevé pour le groupe de conduites C1 et la municipalité B et faible pour le groupe de conduites A1 et la municipalité D. Puisque ce classement (C, B, D) est similaire à celui des longueurs moyennes des tronçons (respectivement 262 m, 150 m et 86 m), il serait intéressant de vérifier l'impact de la longueur moyenne sur les fonctions de risque.

6.2 Résultats de modélisation

Le but de la modélisation est de reproduire la tendance moyenne du nombre annuel de bris sur un réseau et de prédire cette tendance dans le futur. Les valeurs optimales des paramètres de calage obtenues précédemment sont injectées dans l'Équation 5.50 afin d'estimer le nombre annuel moyen de bris de chacun des réseaux à l'étude. Les résultats de modélisation obtenus sont ensuite comparés au nombre annuel de bris observés dans chacun des cas d'application. Il est clair que la prise en compte du facteur de risque lié à l'installation des conduites avant et après 1960 dans les municipalités A et C permet de reproduire la tendance générale du nombre annuel de bris observés de façon plus satisfaisante.

6.2.1 Municipalité A

La Figure 6.5 présente les résultats de modélisation obtenus pour la municipalité A, qui comporte le plus long historique de bris à notre disposition (21 ans), représentant 19.8% de l'historique du réseau. Il est à noter que le calage a été fait à partir de 75% des bris observés (ceux qui ont pu être liés au tronçon sur lequel ils ont eu lieu) mais que le nombre annuel de bris observés présenté représente tous les bris recensés durant la période d'archivage. La proportion de 75% des bris ayant servi au calage est la plus faible de notre étude. Les résultats obtenus en utilisant un seul jeu de paramètres de calage ne permet pas de distinguer entre les groupes de tronçons installés avant et après 1960 alors que ceux obtenus avec deux jeux de paramètres de calage distinguent ces deux groupes. Il est clair que la prise en compte de l'installation de tronçons avant et après 1960 améliore la qualité des résultats. En effet, la courbe obtenue avec deux jeux de paramètres reproduit de façon plus satisfaisante la tendance générale des points observés. La Figure 6.6 présente le nombre annuel moyen de bris provenant de chacun de ces deux groupes de tronçons, qui, une fois additionnés, nous donnent le nombre moyen de bris par année pour cette municipalité. On remarque qu'une très grande proportion des bris ont lieu sur les tronçons posés pendant et après 1960 (A2), donc sur les tronçons "plus jeunes". Tel que mentionné auparavant, il n'est pas possible d'identifier la raison exacte expliquant ce comportement. Des raisons possibles sont : une qualité de matériau moins performante, un changement de technique d'installation, le développement d'un secteur de la municipalité comportant des facteurs de risque non identifiés dans cette étude, etc.

6.2.2 Municipalité B

La Figure 6.7 présente les résultats de modélisation pour la municipalité B, qui, rappelons-le, comporte le plus court historique de bris à notre disposition (7 ans), représentant 8.1% de l'historique du réseau. Le calage a été réalisé à partir de 83% des bris observés. Les valeurs de calage obtenues ne permettent pas au modèle de passer dans le nuage de points observés. En effet, le modèle sous-estime la tendance générale moyenne du nombre annuel de bris sur ce réseau. L'hypothèse principale retenue pour expliquer ce résultat est que la période d'observation est trop courte pour permettre un calage adéquat. Bien que la stratégie de calage ait été développée pour tenir compte des courts historiques de bris, l'incertitude sur la valeur des paramètres de calage sera plus grande pour des historiques plus courts. À la limite, il est clair que si nous ne disposons, par exemple, que d'une année de données, il ne sera pas possible de reproduire adéquatement la tendance. Une analyse complémentaire a été réalisée afin de vérifier cette hypothèse. Les résultats sont présentés plus loin.

6.2.3 Municipalité C

La Figure 6.8 présente les résultats de modélisation obtenus pour la municipalité C, qui comporte un historique de bris de 16 ans, représentant la plus grande proportion (30.8%) des historiques de réseau à notre disposition. Le calage a été réalisé à partir de 85% des bris observés. Tout comme pour la municipalité A, les résultats obtenus en faisant une distinction entre les groupes de tronçons installés avant et après 1960 reproduisent de façon plus satisfaisante la tendance générale observée. Toutefois, l'amélioration n'est pas aussi marquée que pour la municipalité A. La Figure 6.9 présente les résultats de modélisation obtenus pour les deux groupes de tronçons et pour le modèle retenu. On remarque, tout comme pour la municipalité A, qu'une très grande proportion des bris ont lieu sur les tronçons les "plus jeunes" (C2).

6.2.4 Municipalité D

La Figure 6.10 présente les résultats de modélisation pour la municipalité D, qui comporte un historique de bris de 10 ans, représentant 20.8% de l'historique du réseau. Le calage a été réalisé à partir de 94% des bris observés, qui est le plus grand pourcentage à notre disposition. Les valeurs de calage obtenues permettent tout juste au modèle de passer dans le nuage de points observés. En effet, le modèle sous-estime légèrement la tendance générale moyenne du nombre annuel de bris sur ce réseau. La durée de la

période d'observation semble être trop courte pour obtenir des valeurs de paramètres de calage statistiquement représentatives de l'ensemble du réseau. La section suivante présente la méthode utilisée pour vérifier cette hypothèse.

6.2.5 Impact de la durée de la période archivée sur les résultats de modélisation

À l'aide des données de la municipalité C (bien pourvue en données, période d'archivage couvrant 30.8% de l'historique du réseau), nous estimons les valeurs des paramètres de calage pour chacune des périodes d'archivage des bris à partir de la fonction de vraisemblance définie pour le modèle à un seul jeu de paramètres. En effet, nous tronquons l'historique de bris de 16 ans [1981, 1996] en plusieurs périodes de plus courtes durées afin de voir l'impact sur les résultats de modélisation. Les périodes choisies sont : [1982, 1996], [1983, 1996], [1986, 1996] et [1990, 1996], représentant respectivement 28.8%, 26.9%, 21.2% et 13.5% de la durée de l'historique du réseau. Nous choisissons le modèle à un seul jeu de paramètres plutôt que celui à deux jeux de paramètres afin d'avoir le plus grand nombre de données disponibles pour le calage, puisque le nombre de données sera réduit en tronquant l'historique. Les pourcentages du nombre total de bris disponibles pour le calage sont respectivement de 97%, 92%, 82% et 57% pour ces périodes. La Figure 6.11 présente les résultats de modélisation obtenus. Les courbes pour les périodes [1981, 1996], [1982, 1996] et [1983, 1996] sont pratiquement impossibles à différencier puisqu'elles sont toutes superposées alors que les résultats obtenus pour les périodes [1986, 1996] et [1990, 1996] nous montrent que le nombre annuel de bris est sous-estimé par rapport aux bris observés lorsque la période archivée est de trop courte durée. Nous observons de fait ce comportement pour les municipalités B et D, comportant les plus courts historiques de bris. Cette analyse préliminaire n'a pas été poussée plus loin et il serait souhaitable d'approfondir la réflexion dans le cadre de recherches futures.

Exception faite de la municipalité B où la valeur du paramètre p est inférieure à 1, les jeux de paramètres de calage obtenus par la maximisation de la fonction de vraisemblance pour les cas d'application permettent de reproduire de façon adéquate et satisfaisante la tendance générale du nombre annuel de bris, surtout compte tenu du fait que nous travaillons avec de court historique de bris. Il ne faut pas s'attendre à ce que la stratégie de modélisation permette de reproduire la variabilité du nombre annuel de bris due à des facteurs autres que la détérioration "normale" des conduites résultant du vieillissement (ce qui, en

gros, veut dire l'affaiblissement des conduites à cause de la corrosion). Par contre, les données sur les bris dans une municipalité reflètent l'histoire des tronçons, *i.e.* l'influence de certains facteurs de risque est reflétée dans l'historique des bris. Bien que leur influence soit implicitement prise en compte dans les données, certains facteurs ne peuvent être pris explicitement en compte par la modélisation parce qu'ils sont difficilement prévisibles et leur impact est difficilement quantifiable, tels : les hivers rigoureux, les inondations, les mouvements de sol. Des exemples de facteurs qui pourraient être pris en compte explicitement par l'utilisation du modèle de Cox sont : le diamètre, le type de matériau, le trafic. Il faudrait, pour cela, adapter le modèle de Cox aux courts historiques de bris. La section suivante présente les résultats obtenus suite à l'application de différents scénarios de remplacement de tronçons.

6.3 Scénarios de remplacement

Les scénarios de remplacement sont exprimés en terme de pourcentage de la longueur totale du réseau en 1996 à remplacer par année pendant l'horizon de prédiction de 20 ans. Trois scénarios sont considérés et comparés à la situation de référence (0.0%) : 0.5%, 1.0% et le maintien du nombre annuel de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996. Dans tous les cas, aucun nouveau tronçon n'est posé après 1996. Ce scénario de non-croissance des municipalités a été retenu pour trois raisons principales : (1) il est difficile de savoir combien de nouveaux tronçons seront posés durant les deux prochaines décennies pour chacune des municipalités; (2) les nouveaux tronçons installés n'auraient pas un impact majeur sur le nombre annuel de bris pour les prochains 20 ans; et (3) à part pour la municipalité C, les gestionnaires croient que leur municipalité ne connaîtra pas de période marquée de croissance dans les prochaines années. Concernant le point #2, l'étude de la Figure 6.2 nous montre que durant les premiers 20 ans, au pire 30% des tronçons subiront un premier bris durant cette période (groupes de tronçons A2 et C2).

Deux stratégies de remplacement ont été utilisées : (1) **aléatoire**, lorsque les tronçons sont sélectionnés aléatoirement parmi les tronçons qui ont subi au moins un bris, sans tenir compte d'autres facteurs; et (2) **prioritaire**, lorsque parmi les tronçons qui ont subi au moins un bris, certains tronçons sont sélectionnés en priorité selon un critère donné. Pour les deux stratégies, des tronçons à remplacer sont sélectionnés jusqu'à ce que le taux de remplacement annuel spécifié par l'utilisateur soit atteint. Il est à noter que la longueur moyenne des tronçons est utilisée pour convertir le taux de remplacement (nombre de

kilomètres) par année en nombre de tronçons par année. Pour les municipalités B et D, seul le remplacement aléatoire a été utilisé, tandis que pour les municipalités A et C, les deux types de remplacement ont été appliqués. Pour ces municipalités, "Aa" et "Ca" réfèrent au remplacement aléatoire alors que "Ab" et "Cb" réfèrent au remplacement prioritaire des tronçons installés pendant et après 1960.

Les Figures 6.12 à 6.17 présentent les résultats de modélisation obtenus, selon les différents scénarios de remplacement, pour les quatre cas d'application et pour un horizon de prédiction de 20 ans. Ces figures confirment l'impact majeur qu'a le remplacement de tronçons sur le nombre annuel de bris sur un réseau. Il est clair que le remplacement prioritaire des tronçons installés pendant et après 1960 pour les municipalités A et C améliore l'état global du réseau plus rapidement qu'en faisant du remplacement aléatoire. Le Tableau 6.8 présente l'augmentation du nombre annuel de bris dans 20 ans, exprimée en pourcentage du nombre de bris en 1996, pour la situation de référence (0.0%) et deux scénarios de remplacement (0.5% et 1.0%). Si aucun effort de remplacement n'est fait dans les prochaines années, c'est la municipalité D qui verra le nombre annuel de bris sur son réseau augmenter de la façon la plus marquée (121%). Par ailleurs, un taux de remplacement de moins de 0.5% est nécessaire afin de maintenir le nombre de bris au bout de 20 ans comparable au niveau de ce qu'il était en 1996 pour la municipalité B. Ce tableau quantifie l'impact du remplacement prioritaire par rapport au remplacement aléatoire pour les municipalités A et C.

Tableau 6.8 Augmentation du nombre annuel de bris dans 20 ans, exprimée en pourcentage du nombre de bris en 1996, pour trois scénarios de remplacement

Municipalités	Scénarios de remplacement		
	0.0%	0.5%	1.0%
Aa	63%	41%	19%
Ab	63%	31%	0%
B	32%	-	-
Ca	88%	65%	43%
Cb	88%	62%	36%
D	121%	81%	41%

Le Tableau 6.9 présente le pourcentage de la longueur totale du réseau en 1996 qui doit être remplacé par année afin de maintenir en moyenne le nombre annuel de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996. Maintenir ce niveau de bris sur un réseau veut aussi dire maintenir des équipes d'intervention sur le réseau similaires dans 20 ans à ce qu'elles étaient en 1996. Ces municipalités requièrent des efforts de remplacement de l'ordre de 0.4 à 2.3% par année sur 20 ans. Un plus grand effort en terme de taux de remplacement est requis pour améliorer l'état structural global du réseau par rapport à son état en 1996.

Tableau 6.9 Taux de remplacement nécessaire afin de maintenir le nombre annuel de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996

Municipalités	Taux de remplacement
Aa	1.4%
Ab	1.0%
B	0.4%
Ca	2.3%
Cb	1.8%
D	1.5%

6.4 Analyse complémentaire réalisée

La stratégie de calage telle que présentée dans le cadre de cette thèse a aussi été utilisée pour d'autres modèles, présentés au Tableau 6.10. Le calage a été effectué avec les données de la municipalité A (sans discrimination entre les groupes de tronçons installés avant et après 1960) et les résultats sont présentés en détail dans Mailhot et al. (soumis en 1999). Les valeurs de paramètres de calage obtenues ainsi que les expressions de la fonction de vraisemblance pour chacun des modèles sont présentées à l'Appendice C.

Tableau 6.10 Liste et caractéristiques des modèles considérés pour la municipalité A

Modèles	Ordre de bris	Distribution	Nombre de paramètres
Weibull-Exp. (W-E)	Premier bris	Weibull (κ_1, p_1)	3
	Deuxième bris et plus	Exponentielle (κ_2)	
Weibull-Exp.-Exp. (W-E-E)	Premier bris	Weibull (κ_1, p_1)	4
	Deuxième bris	Exponentielle (κ_2)	
	Troisième bris et plus	Exponentielle (κ_3)	
Weibull-Weibull-Exp. (W-W-E)	Premier bris	Weibull (κ_1, p_1)	5
	Deuxième bris	Weibull (κ_2, p_2)	
	Troisième bris et plus	Exponentielle (κ_3)	
Weibull-Weibull-Exp.-Exp. (W-W-E-E)	Premier bris	Weibull (κ_1, p_1)	6
	Deuxième bris	Weibull (κ_2, p_2)	
	Troisième bris	Exponentielle (κ_3)	
	Quatrième bris et plus	Exponentielle (κ_4)	

6.5 Synthèse

La stratégie de calage développée a été appliquée aux données des quatre cas d'application. Les valeurs des paramètres de calage sont obtenues par maximisation de la fonction de vraisemblance. L'obtention des valeurs pour différentes périodes d'installation (Tableaux 6.1, 6.3, 6.4 et 6.6) a permis de vérifier deux concepts : (1) la programmation de la fonction de vraisemblance était exacte si les valeurs des paramètres obtenues pour la période d'installation couvrant uniquement l'historique de bris (toute l'information nécessaire est donc connue) étaient les mêmes que celles obtenues à l'aide d'un logiciel permettant de faire de l'analyse de survie (*e. g.* STATISTICA^{MD}) et (2) une variation importante des valeurs des paramètres entre les périodes d'installation permet d'identifier un changement de comportement en terme de vieillissement moyen des conduites d'un groupe par rapport à un autre.

Ainsi, cet exercice nous a permis de constater que les tronçons des municipalités A et C qui ont été posés

après 1960 brisaient plus souvent que ceux posés avant. En fait, l'analyse descriptive nous avait déjà permis de constater que les tronçons de la période 1961-1975 étaient ceux qui brisaient plus. Les tronçons posés lors de la période récente ne contribuent que faiblement au nombre annuel de bris observés. Regrouper les tronçons de la période récente avec ceux de la période 1961-1975 ou avec ceux posés avant 1960 aura peu d'impact sur les résultats de modélisation. De plus, puisque nous ne possédons que peu d'information sur le vieillissement moyen de ces tronçons, il est impossible de déterminer s'il est préférable de les regrouper avec l'un ou l'autre de ces groupes. Nous avons fait le choix de les regrouper avec ceux de la période 1961-1975 afin de grossir la taille de l'échantillon. Finalement, au sujet des résultats de calage, nous avons constaté que certaines valeurs du paramètre p étaient inférieures à 1 pour la municipalité B (le risque de premier bris diminue avec le temps), ce qui va à l'encontre du phénomène physique de la détérioration des conduites.

Les résultats de modélisation obtenus pour les municipalités A et C montrent clairement que la prise en compte de deux jeux de paramètres de calage, afin de refléter deux comportements en terme de bris pour les tronçons posés avant et après 1960, permet de reproduire au mieux la tendance à la hausse du nombre annuel de bris sur ces réseaux. Les résultats de modélisation pour la municipalité B nous indiquent que l'historique de bris à notre disposition ne semble pas couvrir une assez grande proportion de l'historique du réseau pour reproduire un vieillissement moyen adéquat des tronçons sur ce réseau. Les résultats de modélisation pour la municipalité D reproduisent la tendance à la hausse du nombre annuel de bris observés, bien que l'on note une légère sous-estimation.

L'avantage certain de la démarche de modélisation par rapport à l'analyse descriptive est qu'elle permet d'estimer le nombre annuel de bris futurs sur un réseau. De plus, la démarche proposée permet de quantifier l'impact de divers scénarios de remplacement sur ce nombre de bris. Le remplacement est la façon la plus sûre mais aussi la plus dispendieuse de "rajeunir" l'âge moyen d'un réseau et d'en prolonger la vie utile. Trois scénarios de remplacement ont été étudiés par rapport au scénario de référence (aucun remplacement) : deux scénarios représentant des pourcentages de 0.5% et de 1.0% de la longueur totale du réseau en 1996 remplacés annuellement et un scénario de stabilité, c'est-à-dire que nous déterminons le pourcentage à remplacer annuellement afin de maintenir le nombre de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996. Deux types de remplacement ont été considérés pour les municipalités A et C, soit le remplacement aléatoire (lorsque les tronçons sont sélectionnés aléatoirement

parmi les tronçons qui ont subi au moins un bris) et le remplacement prioritaire (lorsque parmi les tronçons qui ont subi au moins un bris, les tronçons posés après 1960 sont sélectionnés en priorité). Il est clair que le remplacement prioritaire permet de réduire l'effort requis pour maintenir le réseau dans son état actuel (1% versus 1.4% pour le remplacement aléatoire dans la municipalité A et 1.8% versus 2.3% dans la municipalité C). En général, en excluant les résultats obtenus dans la municipalité B, nous pouvons conclure que l'effort requis pour un scénario de stabilité (et donc un maintien du personnel et des équipements d'intervention dans les années futures) se situe entre 1.0% et 2.5%. À cause de l'incertitude liée au comportement des tronçons posés lors de la période récente en terme de vieillissement moyen, il est plus sage de limiter l'analyse prédictive aux vingt prochaines années. Au delà de ce terme, l'exercice perd de son sens.

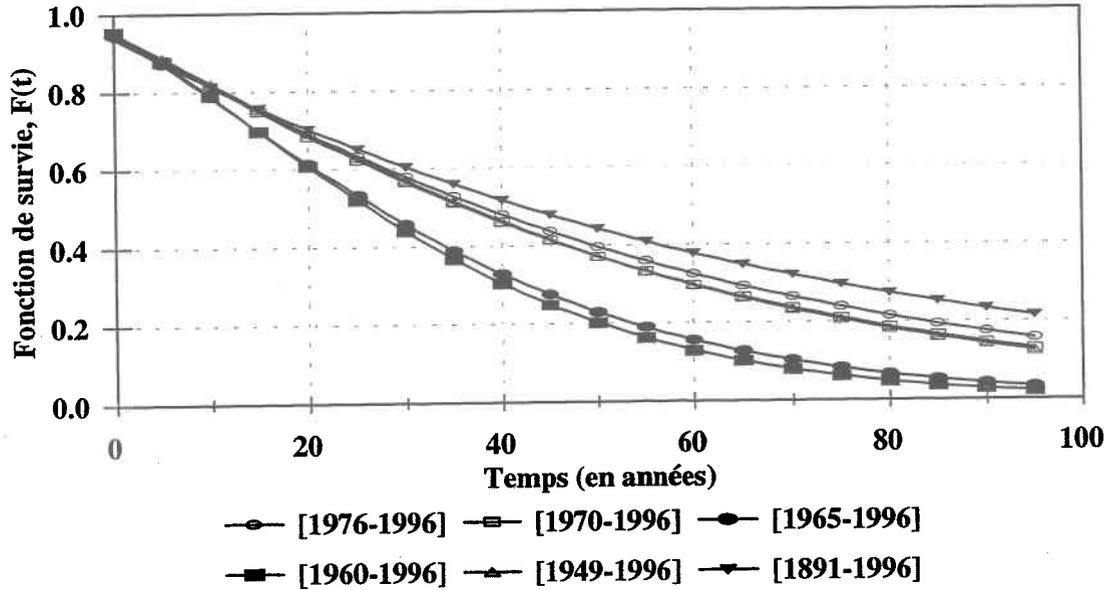


Figure 6.1 Fonctions de survie de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour différentes périodes d'installation pour la municipalité A

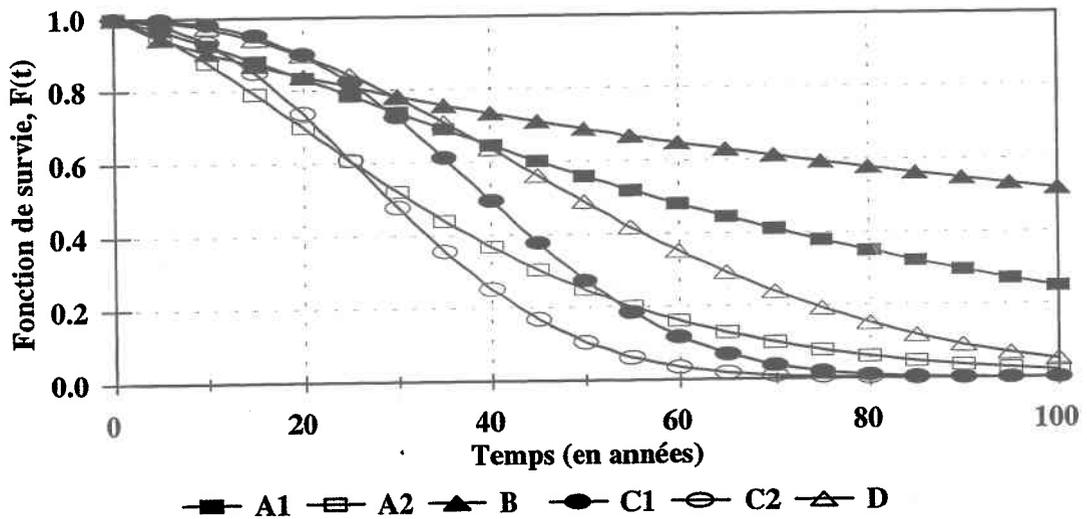
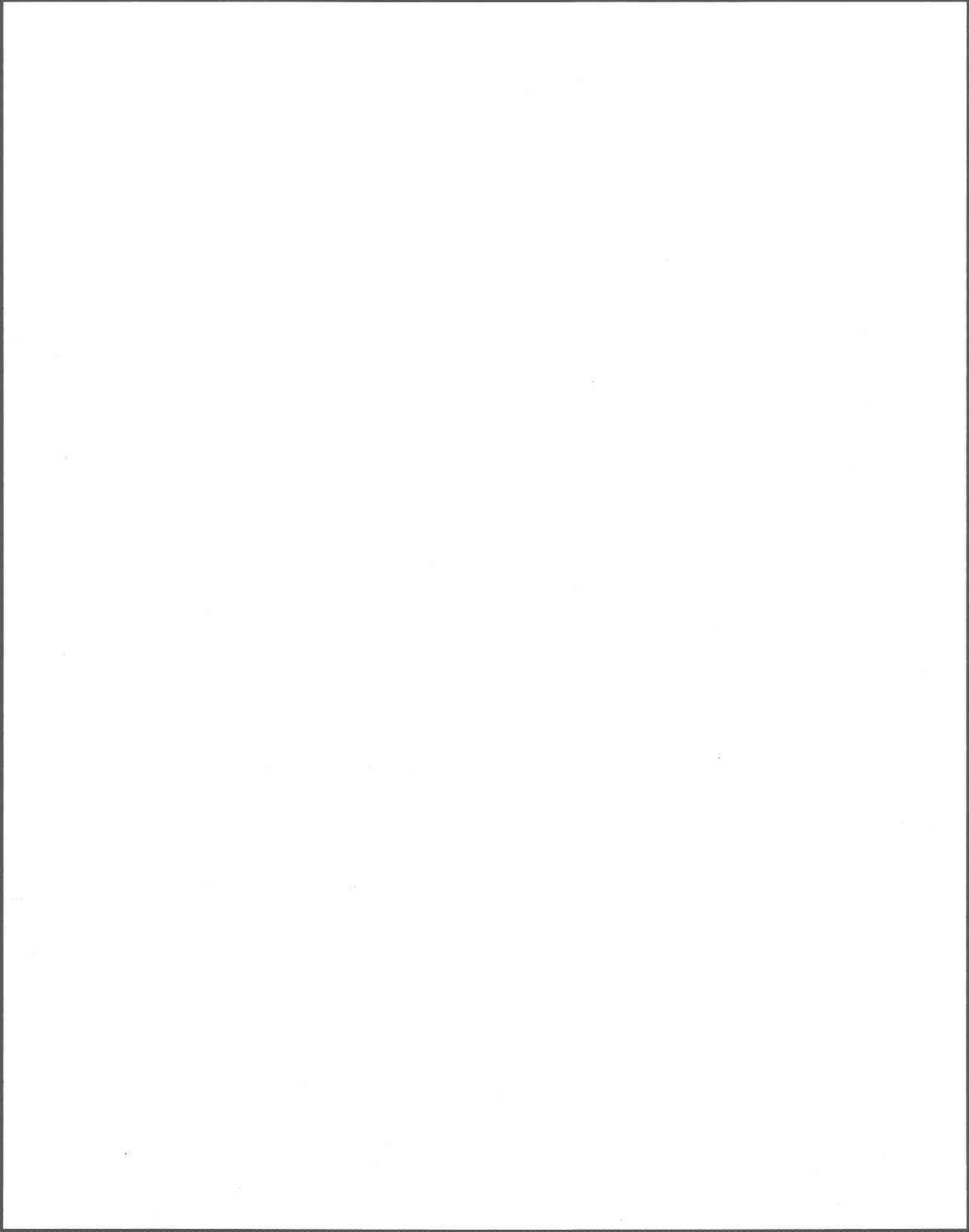


Figure 6.2 Fonctions de survie de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application



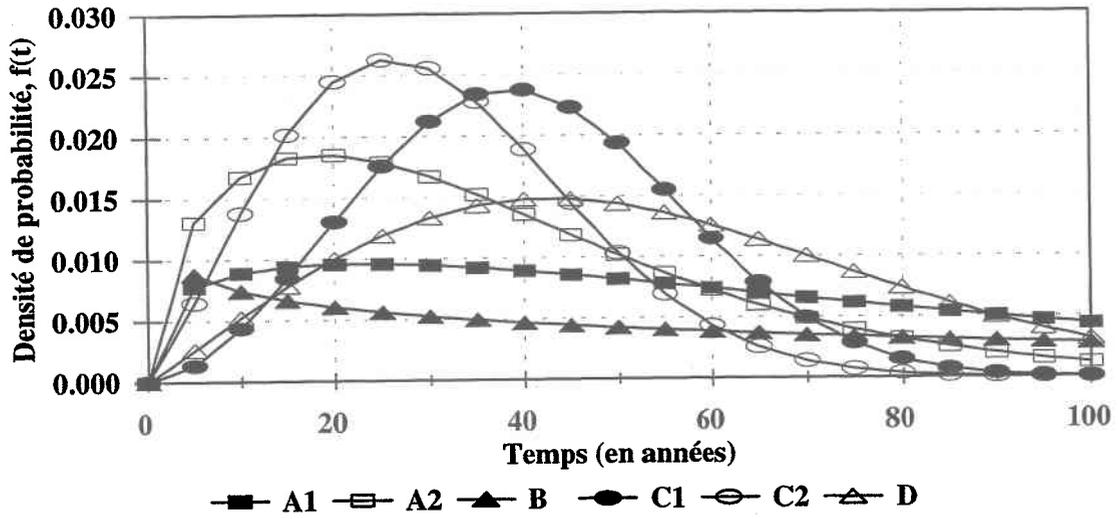


Figure 6.3 Fonctions de densité de probabilité de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application

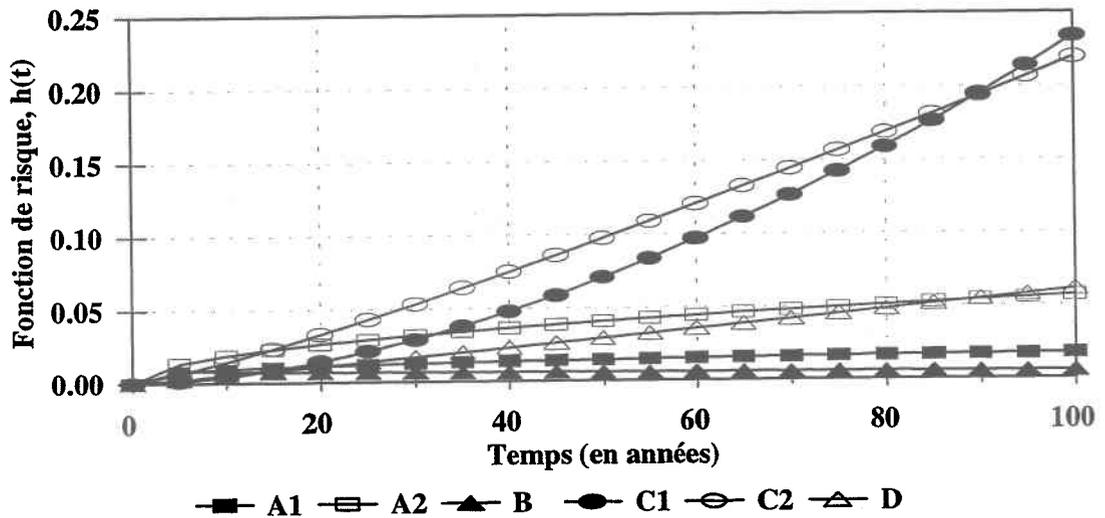
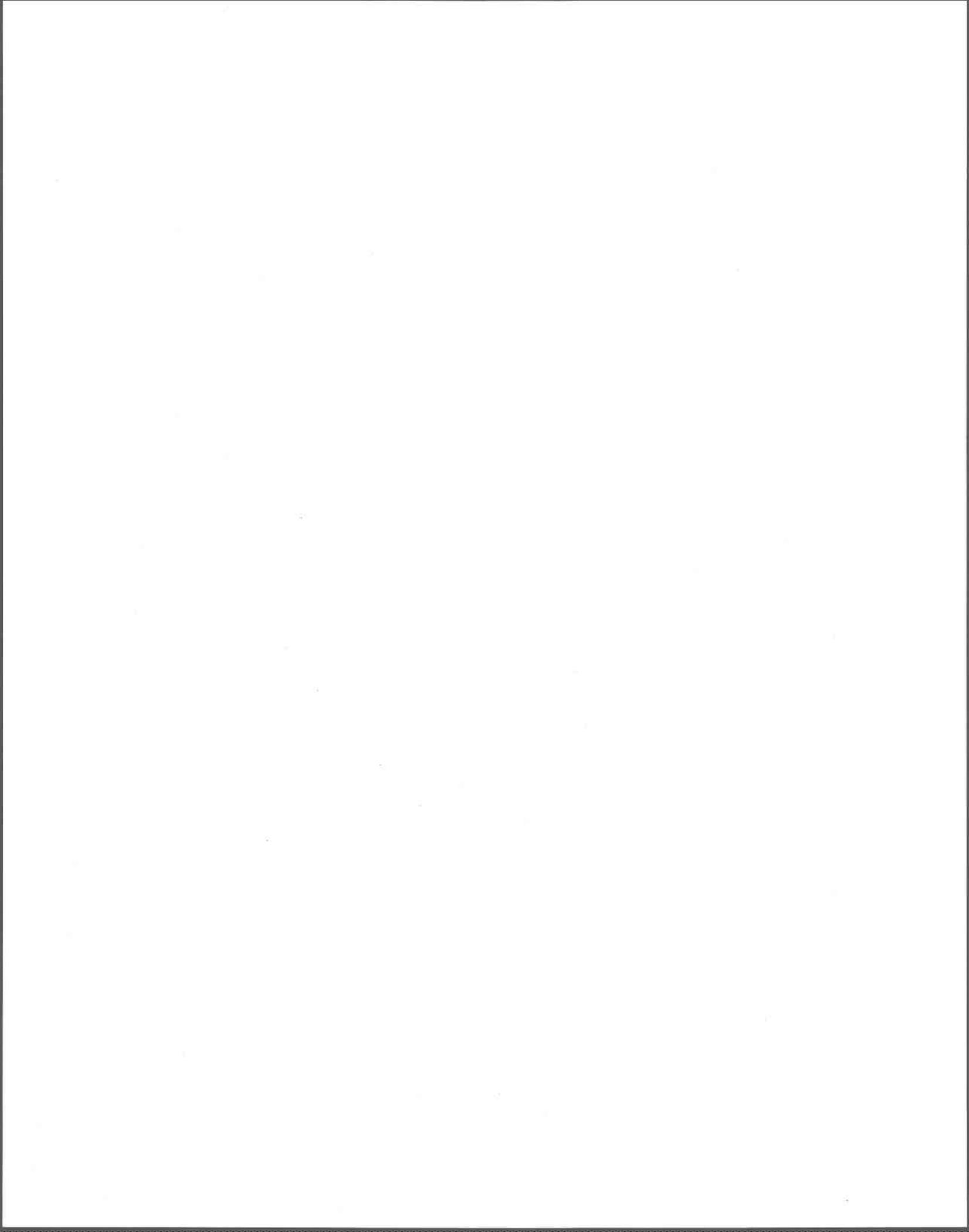


Figure 6.4 Fonctions de risque de la distribution Weibull associée aux premiers bris pour les quatre cas d'application



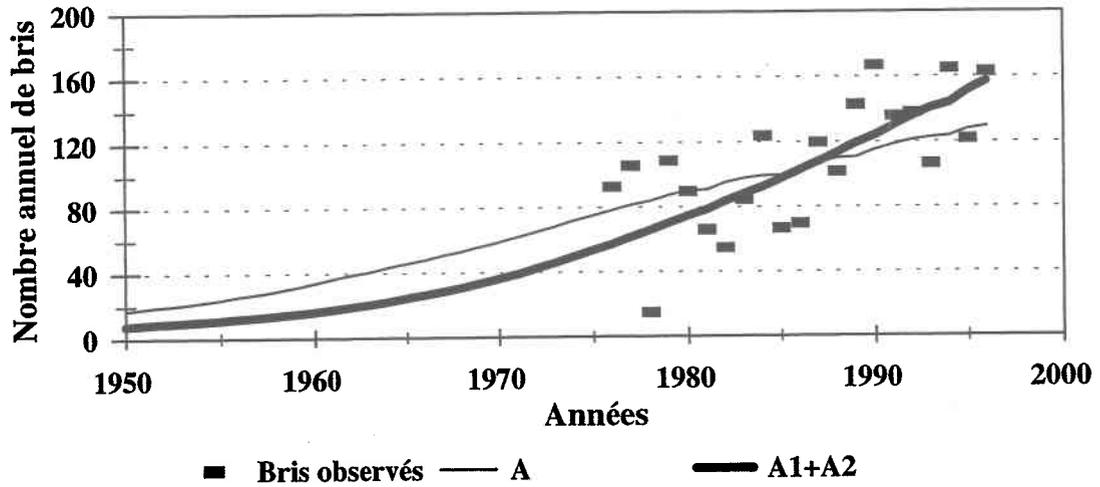


Figure 6.5 Résultats de modélisation avec un seul jeu et avec deux jeux de paramètres de calage et nombre annuel de bris observés pour la municipalité A

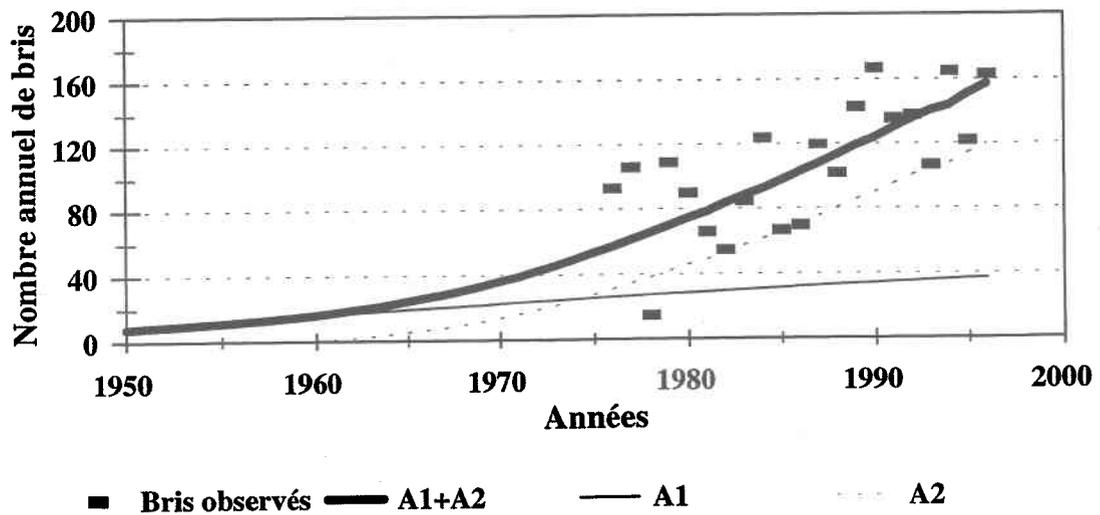
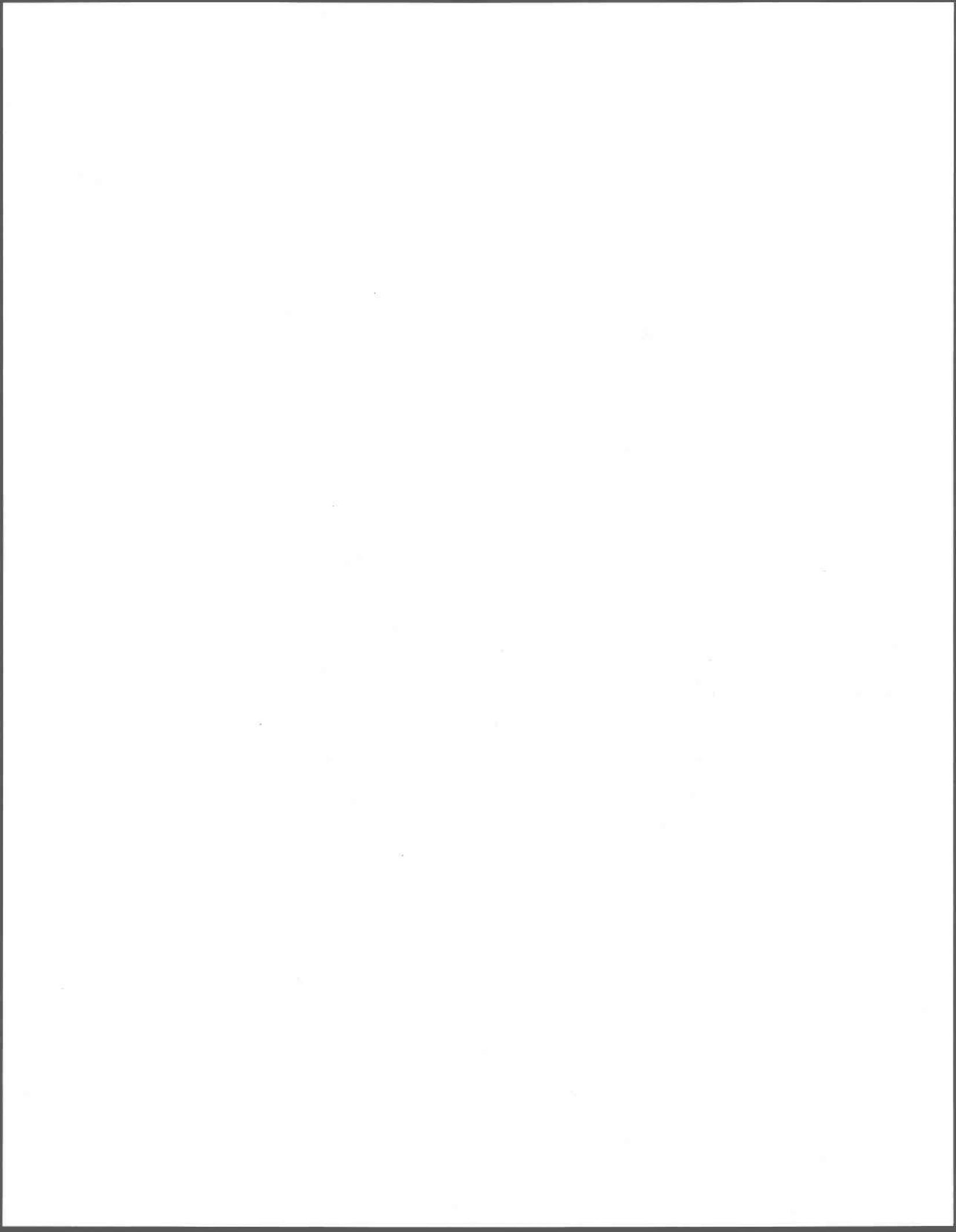


Figure 6.6 Résultats de modélisation pour les deux groupes de tronçons et pour le modèle combinant les deux et nombre annuel de bris observés pour la municipalité A



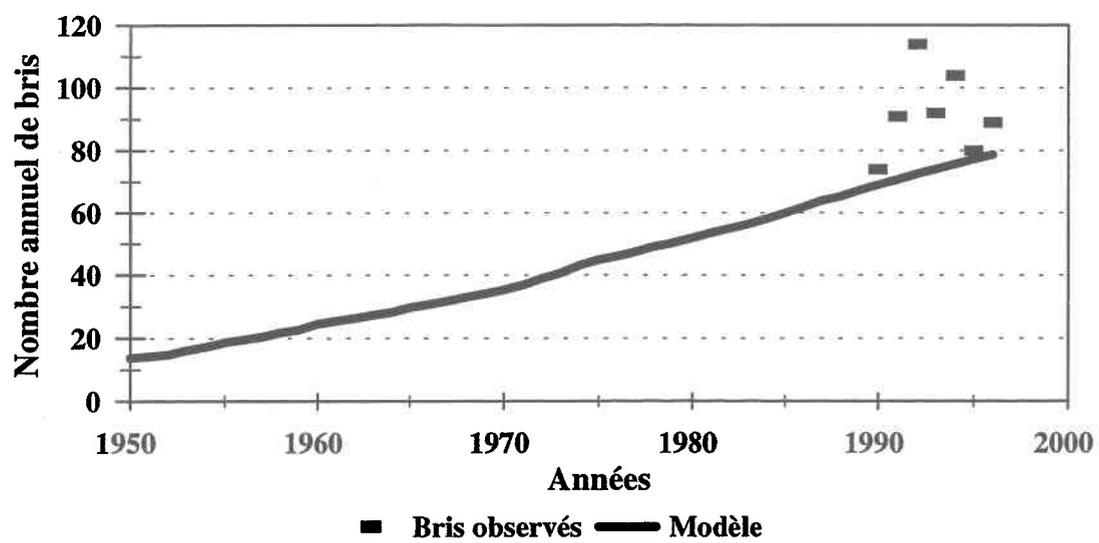
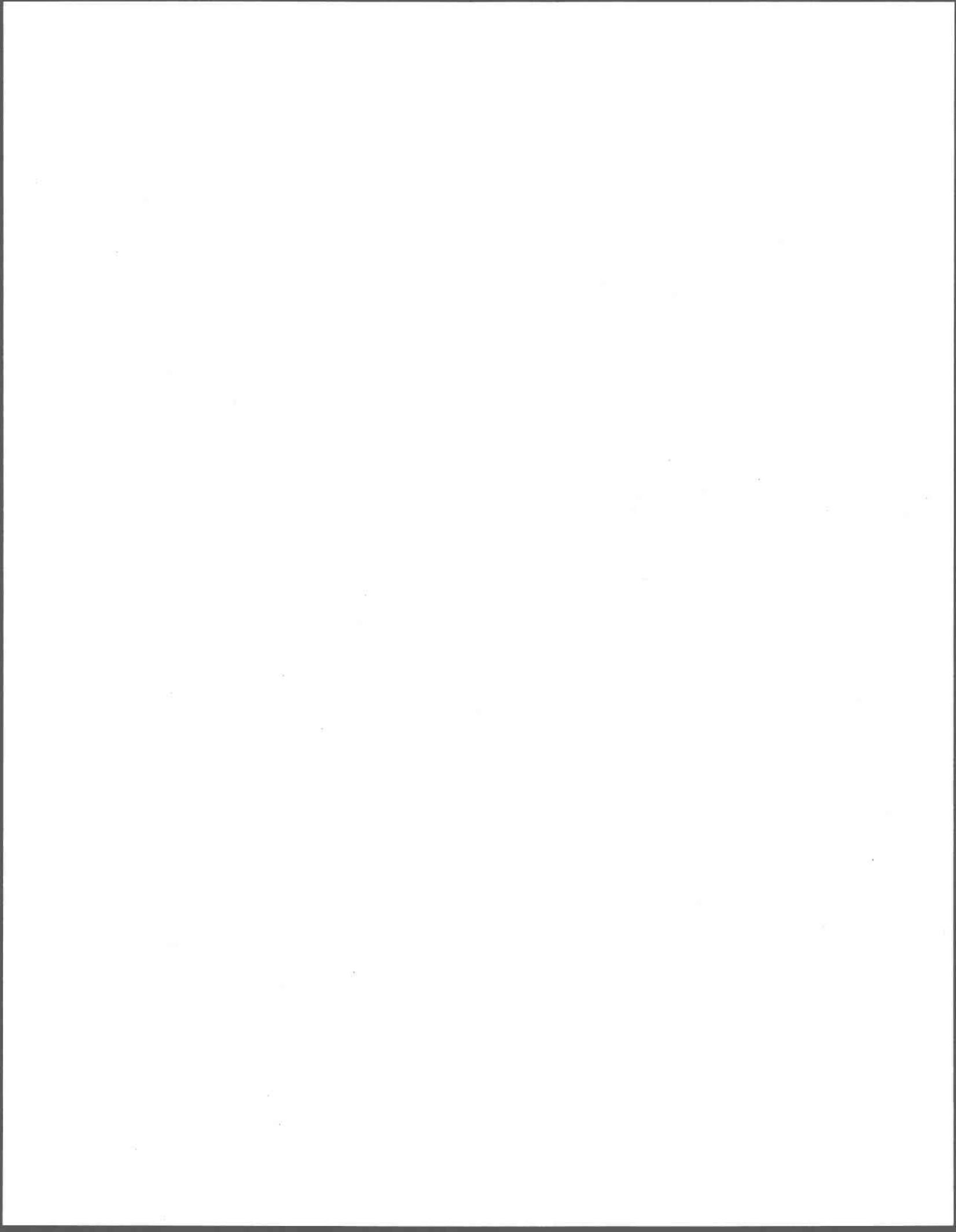


Figure 6.7 Résultats de modélisation et nombre annuel de bris observés pour la municipalité B



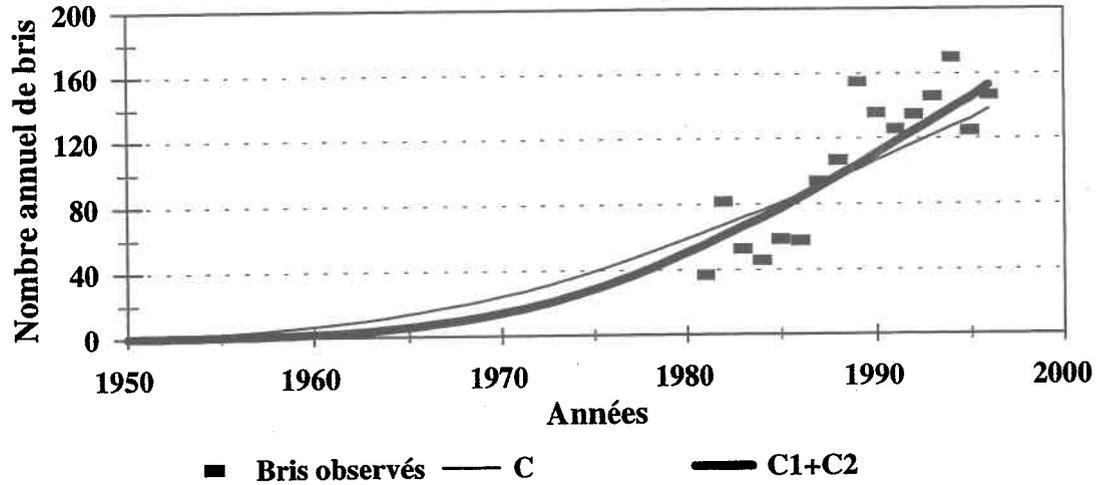


Figure 6.8 Résultats de modélisation avec un seul jeu et avec deux jeux de paramètres de calage et nombre annuel de bris observés pour la municipalité C

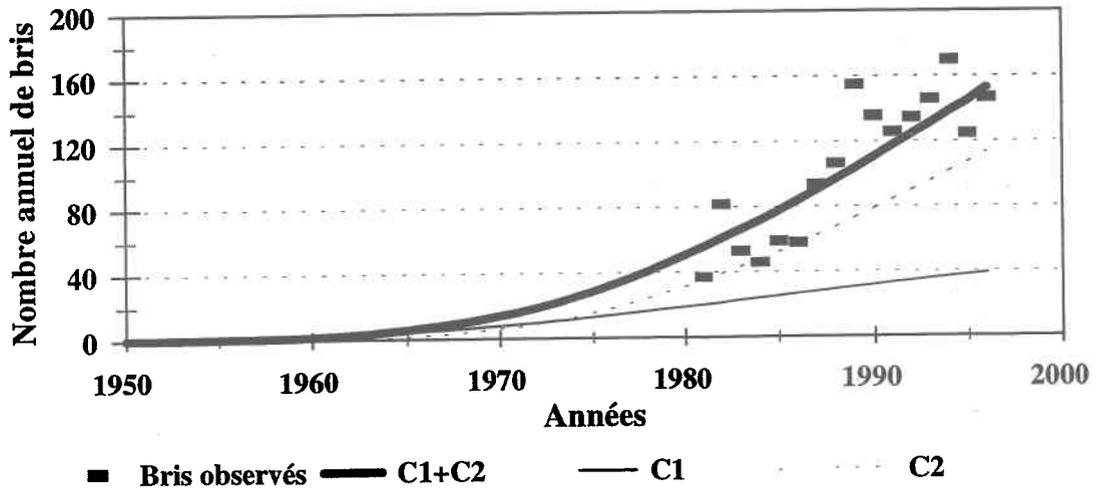
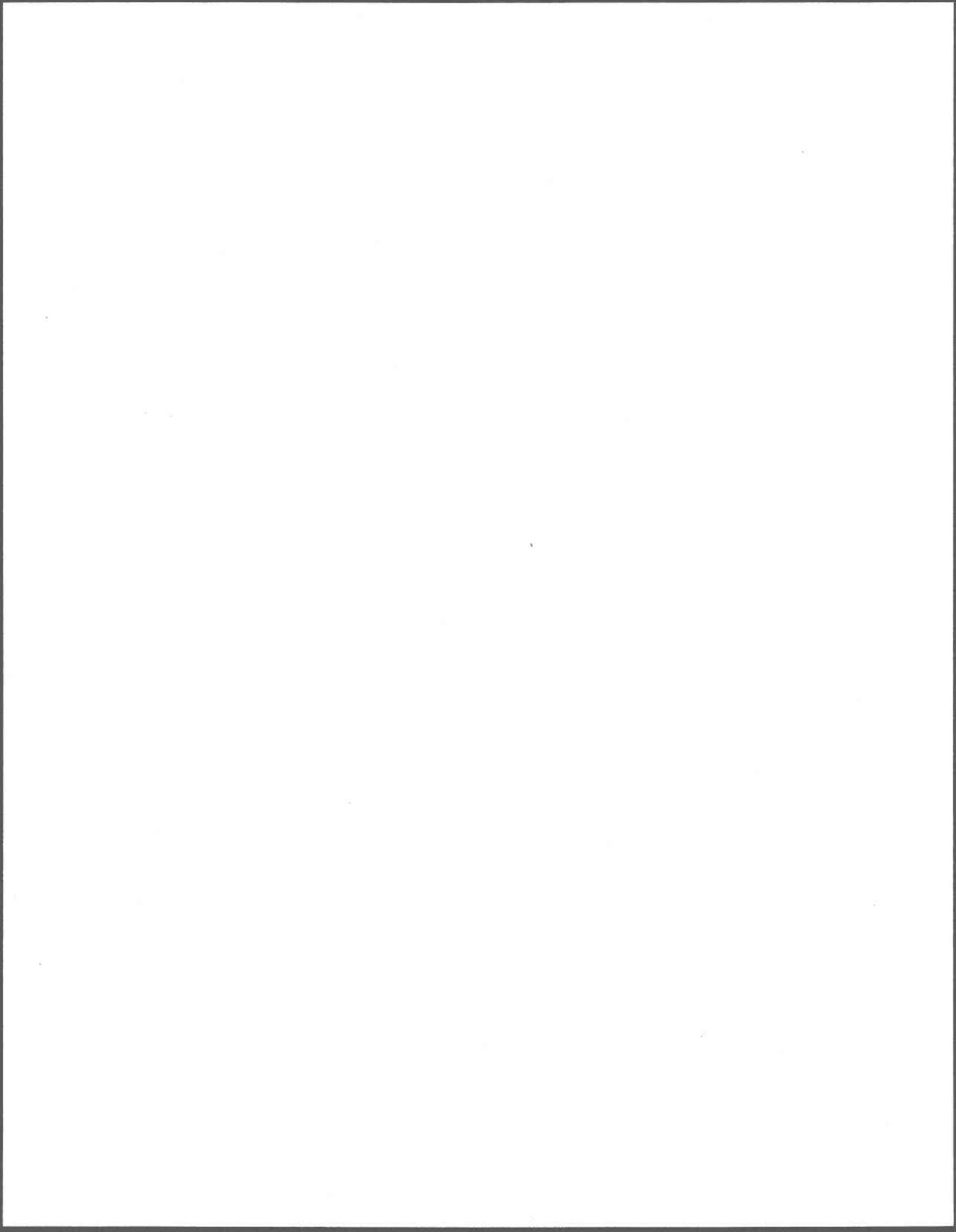


Figure 6.9 Résultats de modélisation pour les deux groupes de tronçons et pour le modèle combinant les deux et nombre annuel de bris observés pour la municipalité C



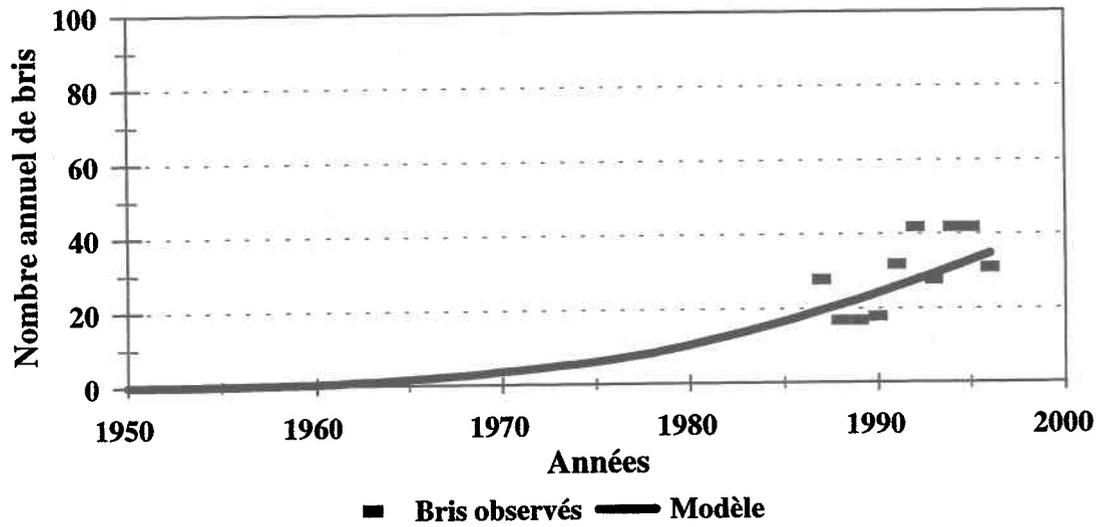
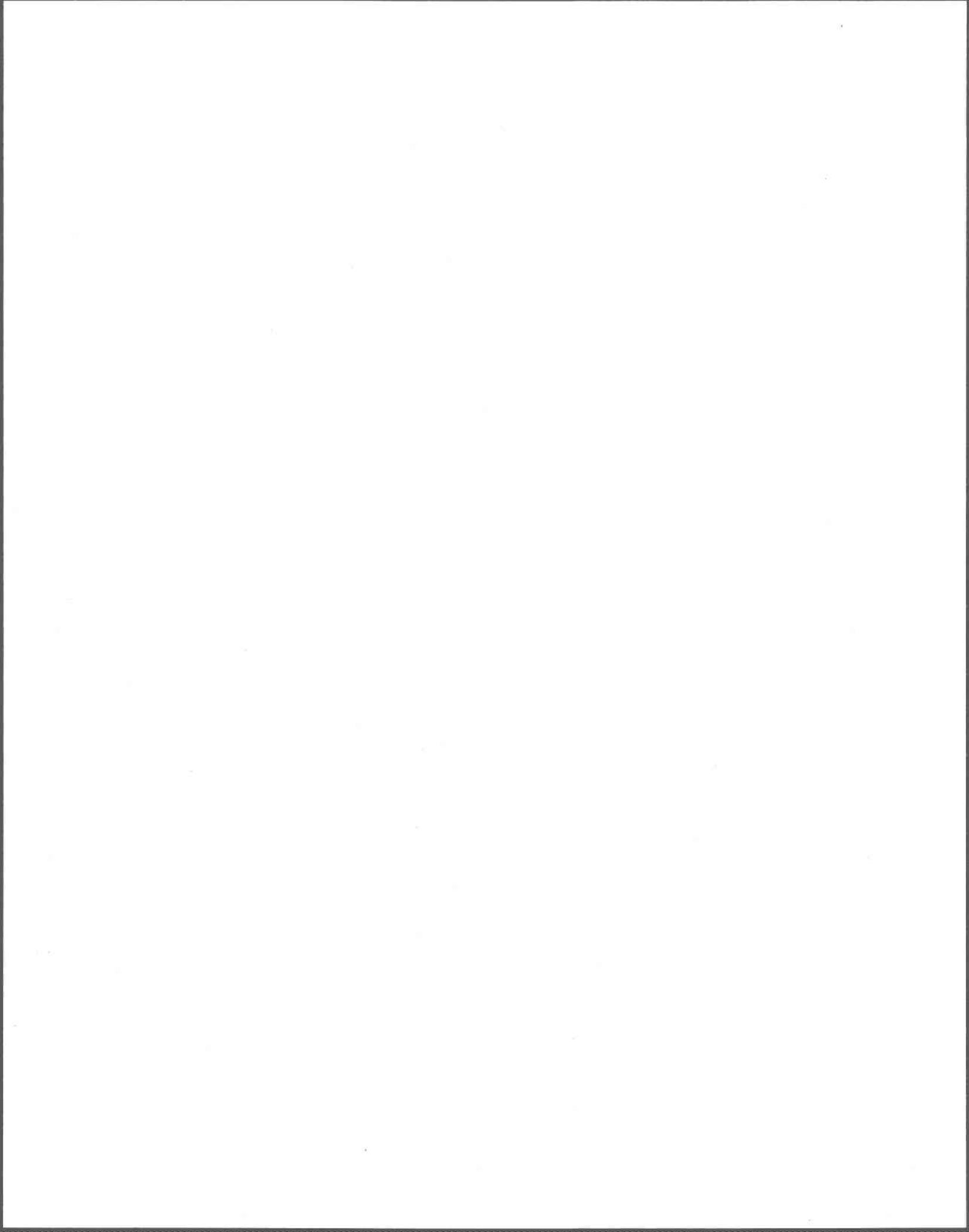


Figure 6.10 Résultats de modélisation et nombre annuel de bris observés pour la municipalité D



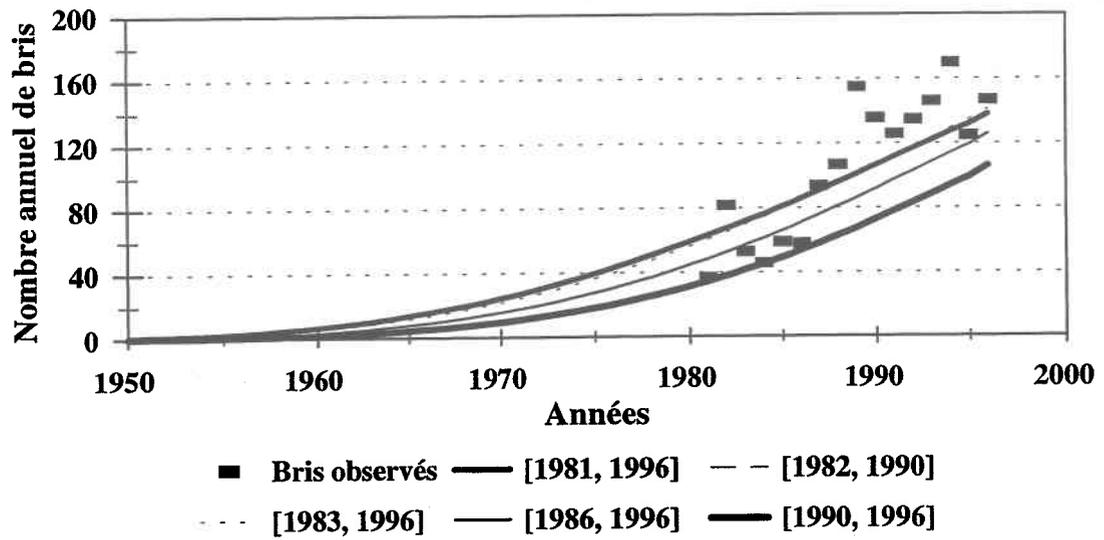
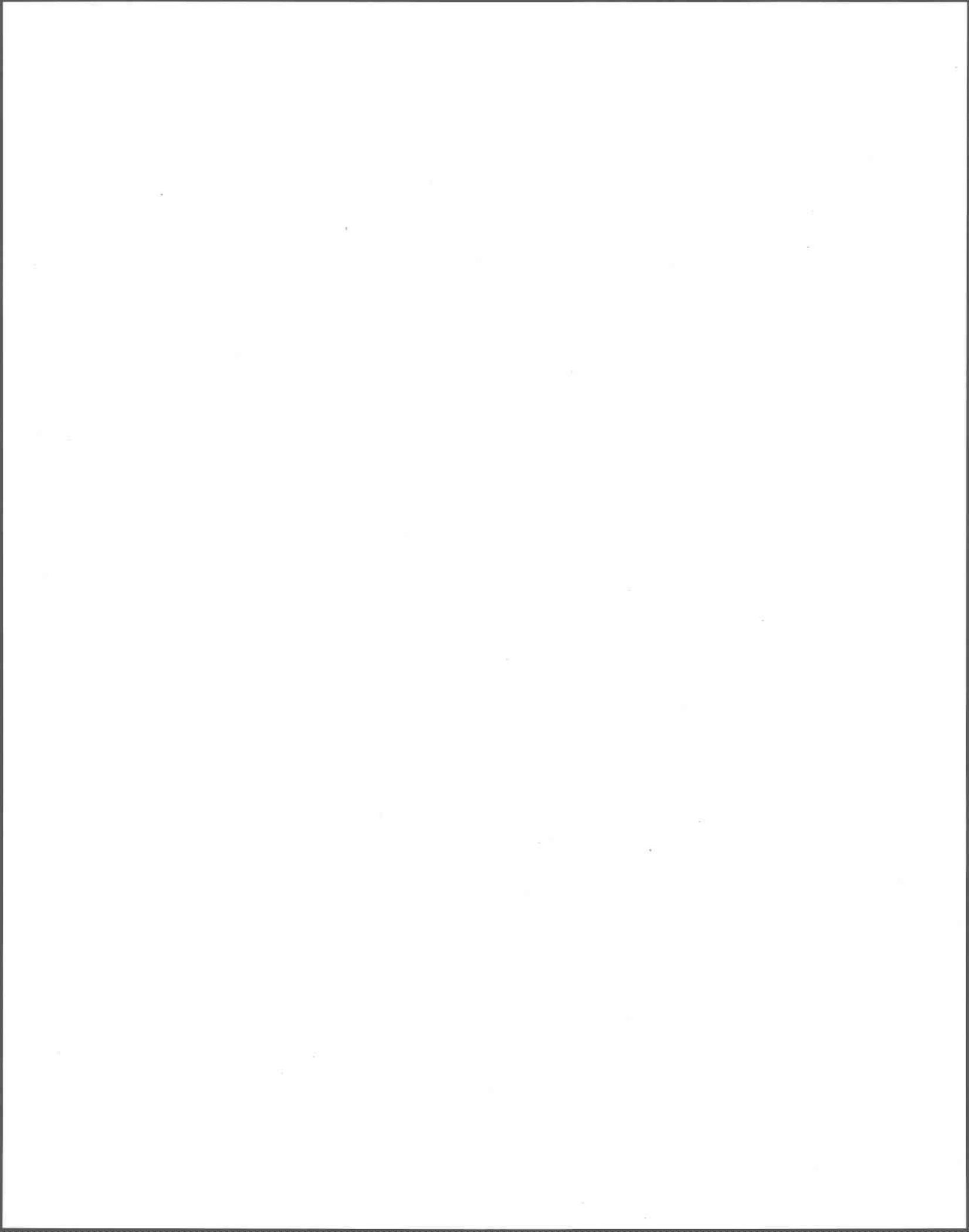


Figure 6.11 Résultats de modélisation avec des paramètres de calage obtenus à partir de différentes périodes d'archivage de bris et nombre annuel de bris observés pour la municipalité C



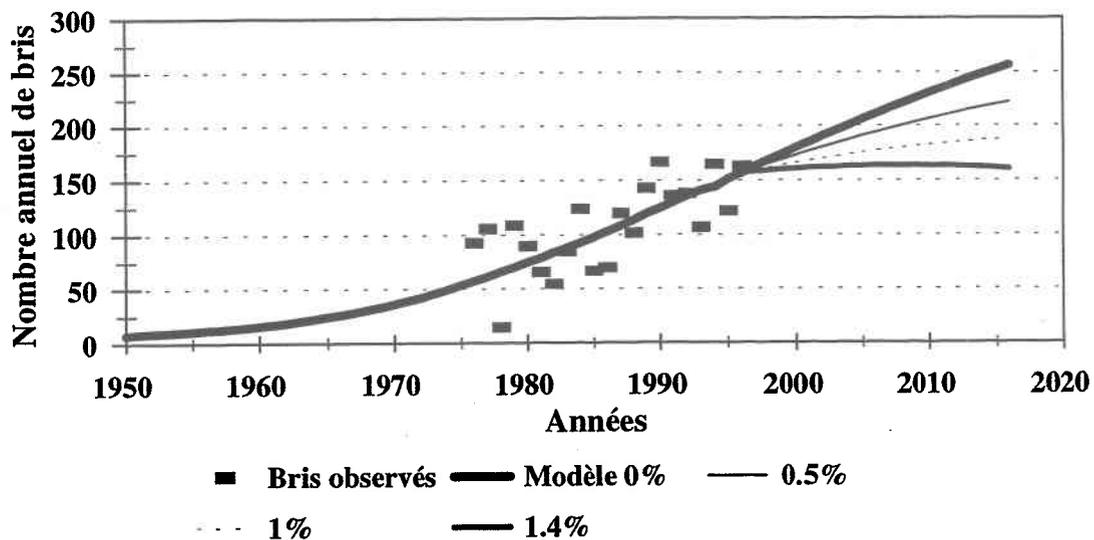


Figure 6.12 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement aléatoire pour la municipalité A

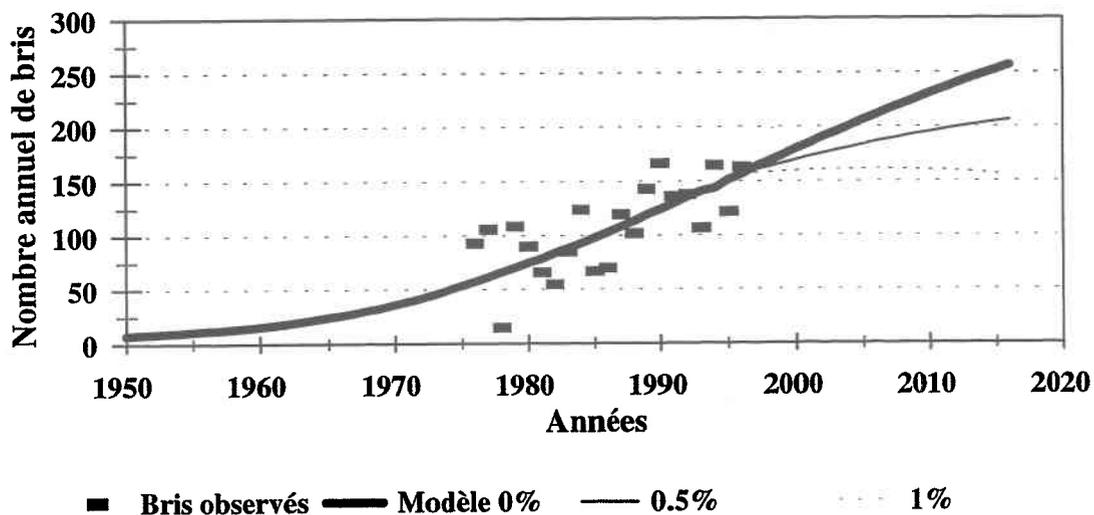
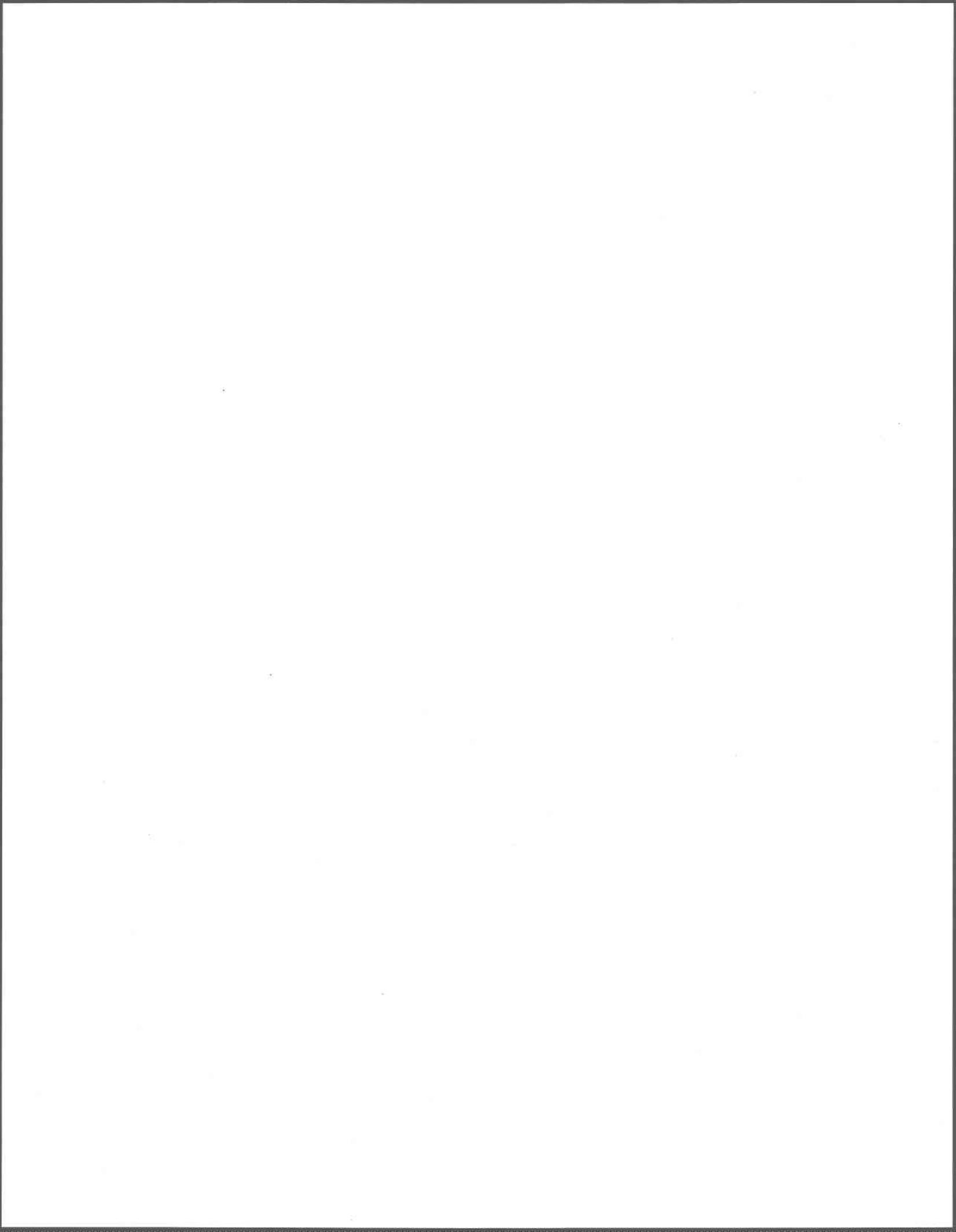


Figure 6.13 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement prioritaire pour la municipalité A



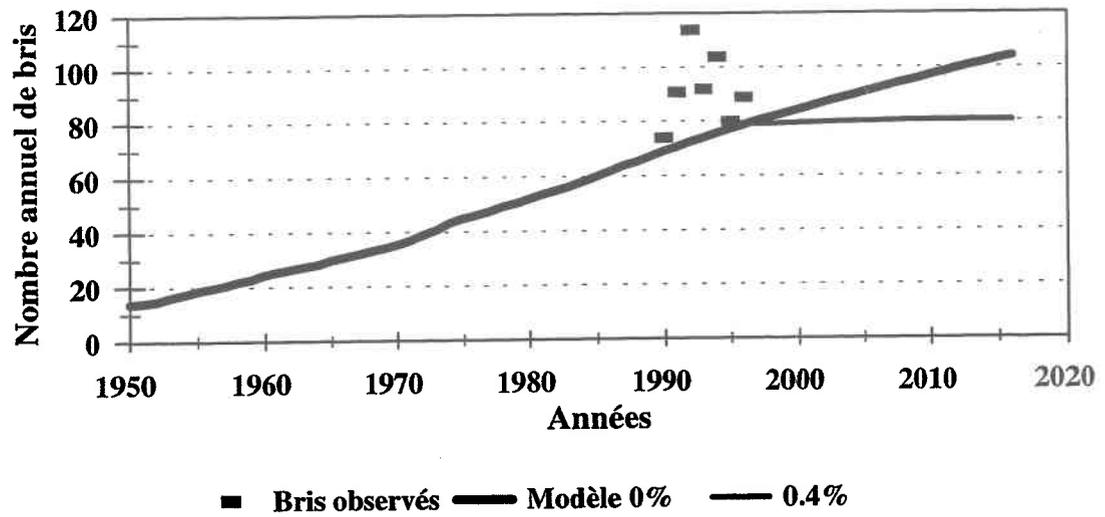
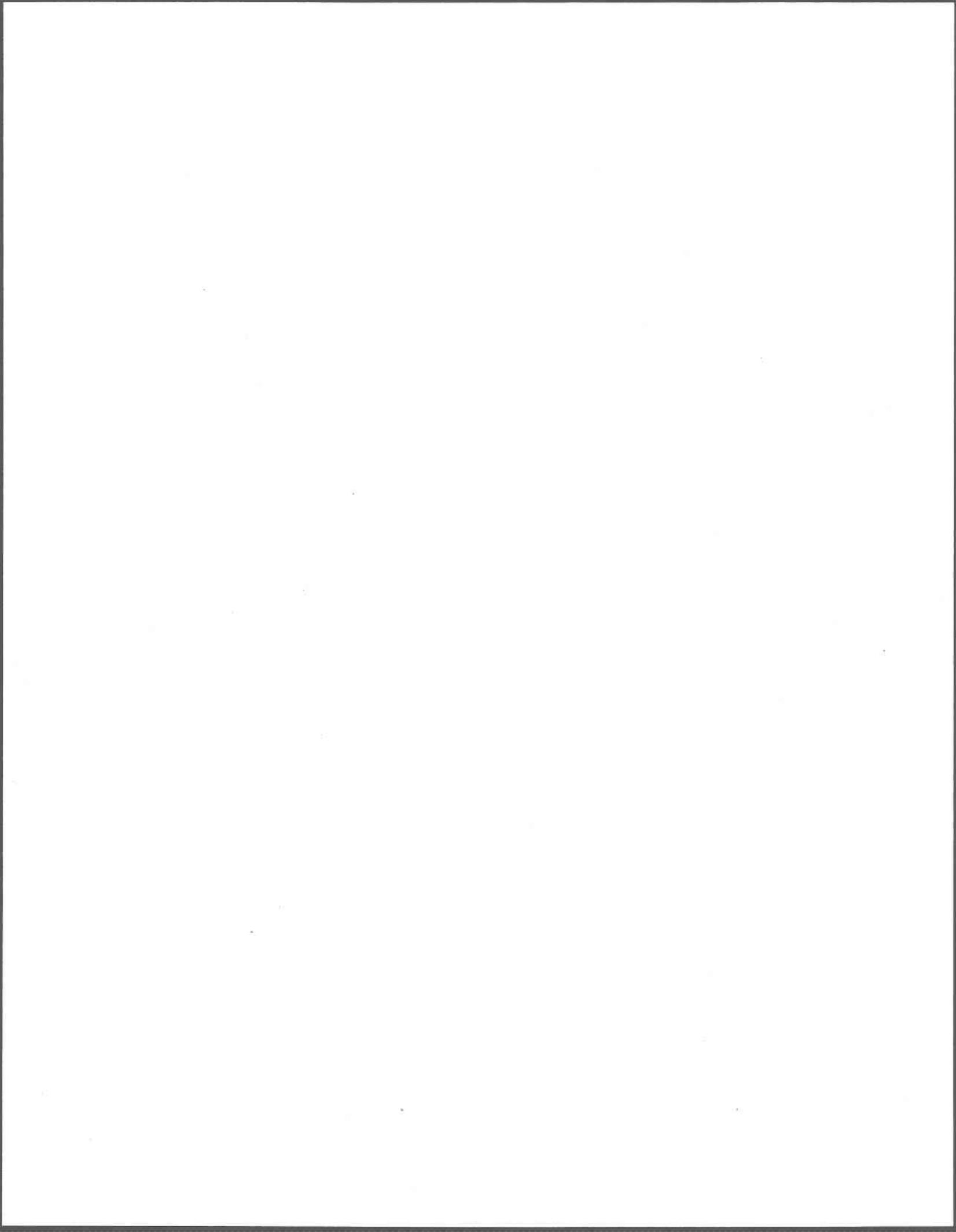


Figure 6.14 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement aléatoire pour la municipalité B



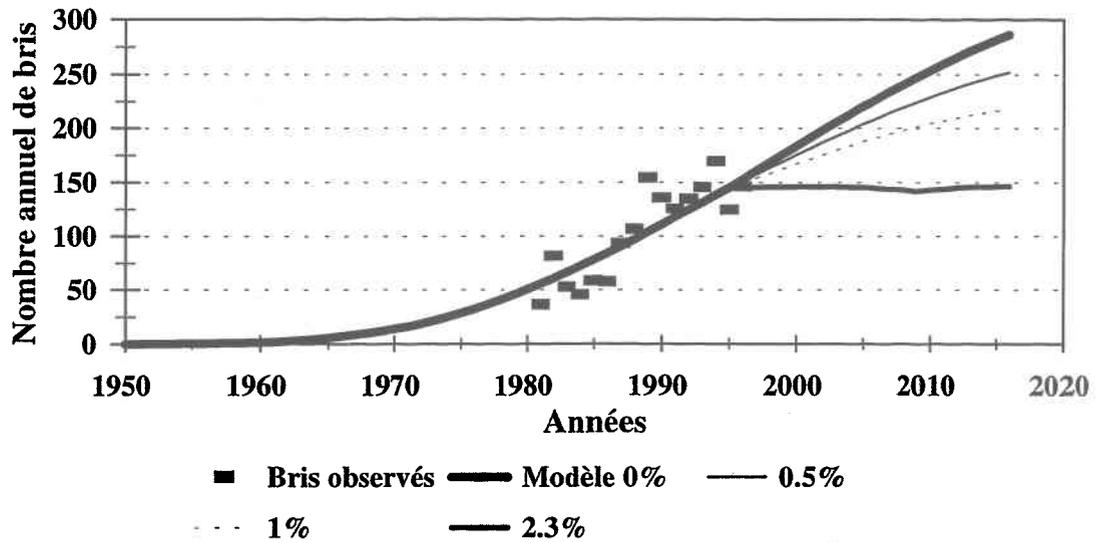


Figure 6.15 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement aléatoire pour la municipalité C

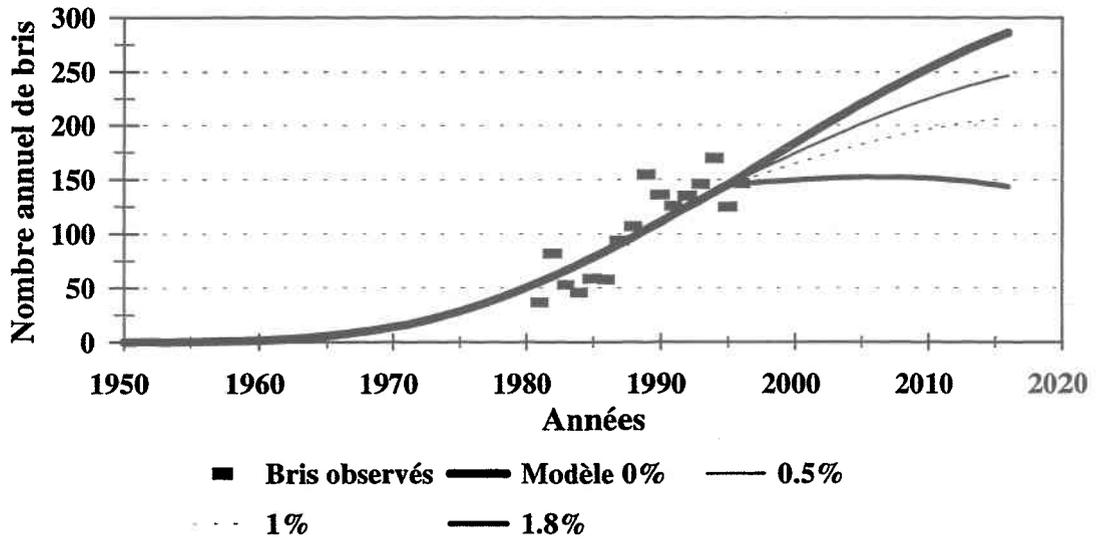
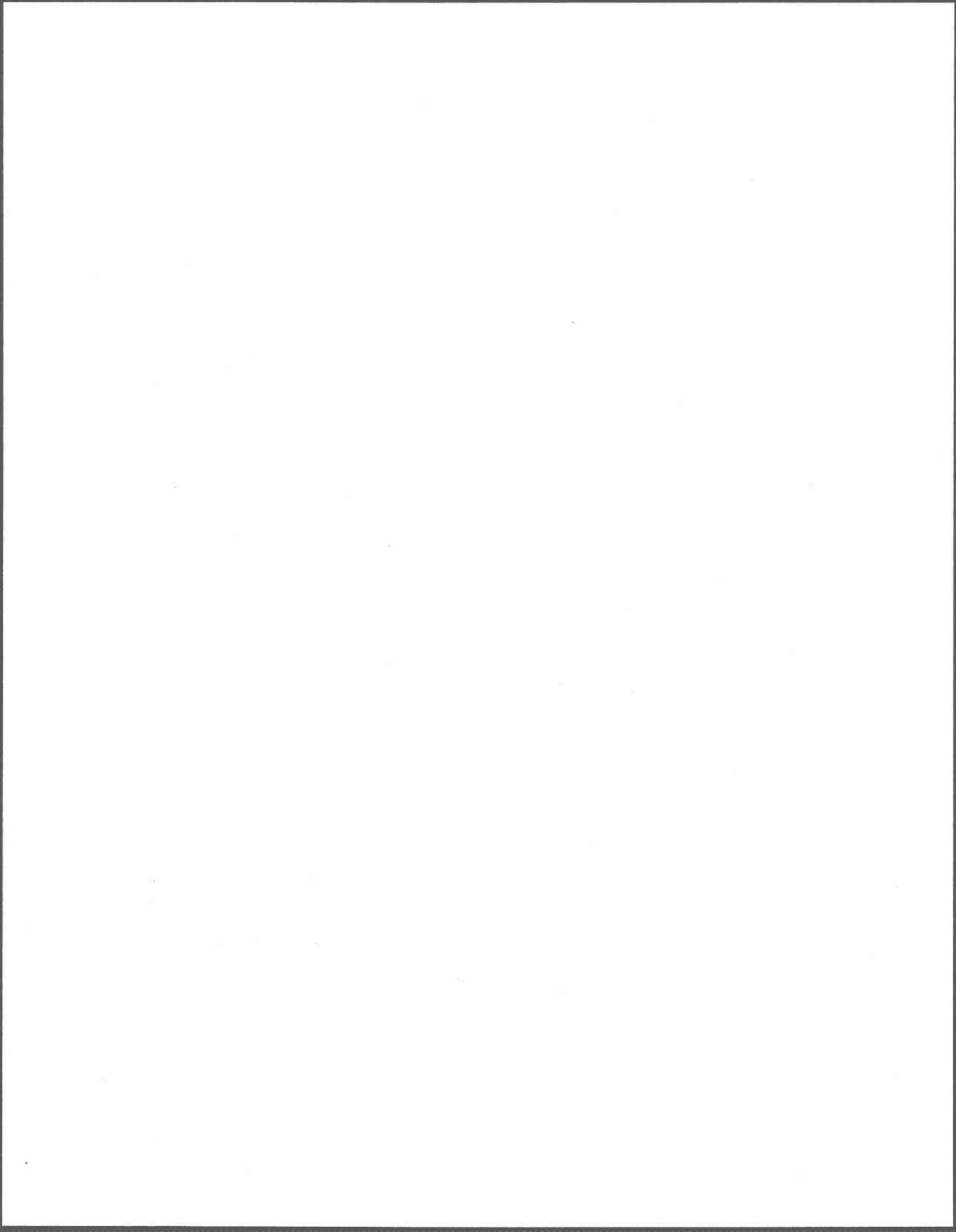


Figure 6.16 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement prioritaire pour la municipalité C



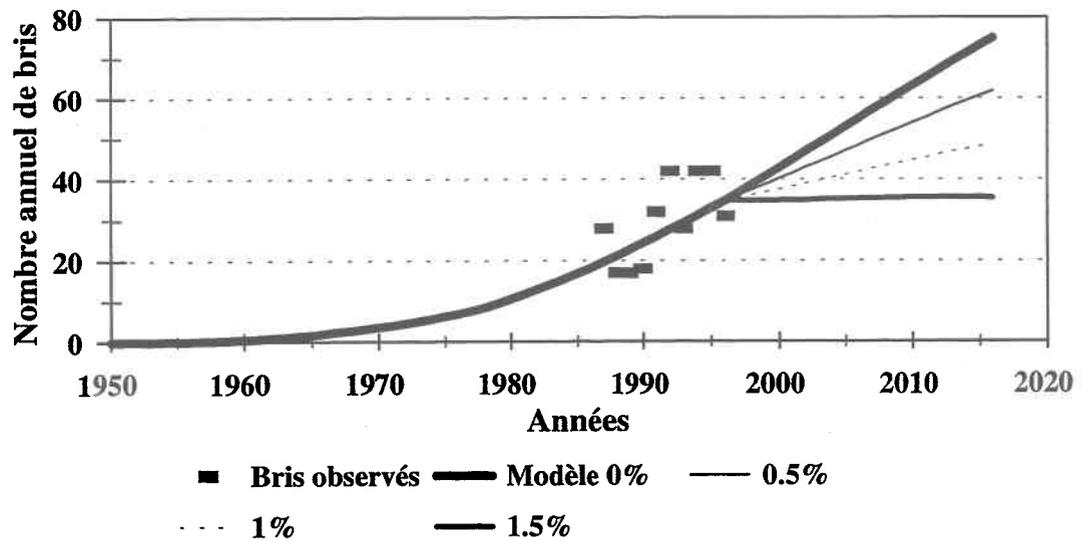
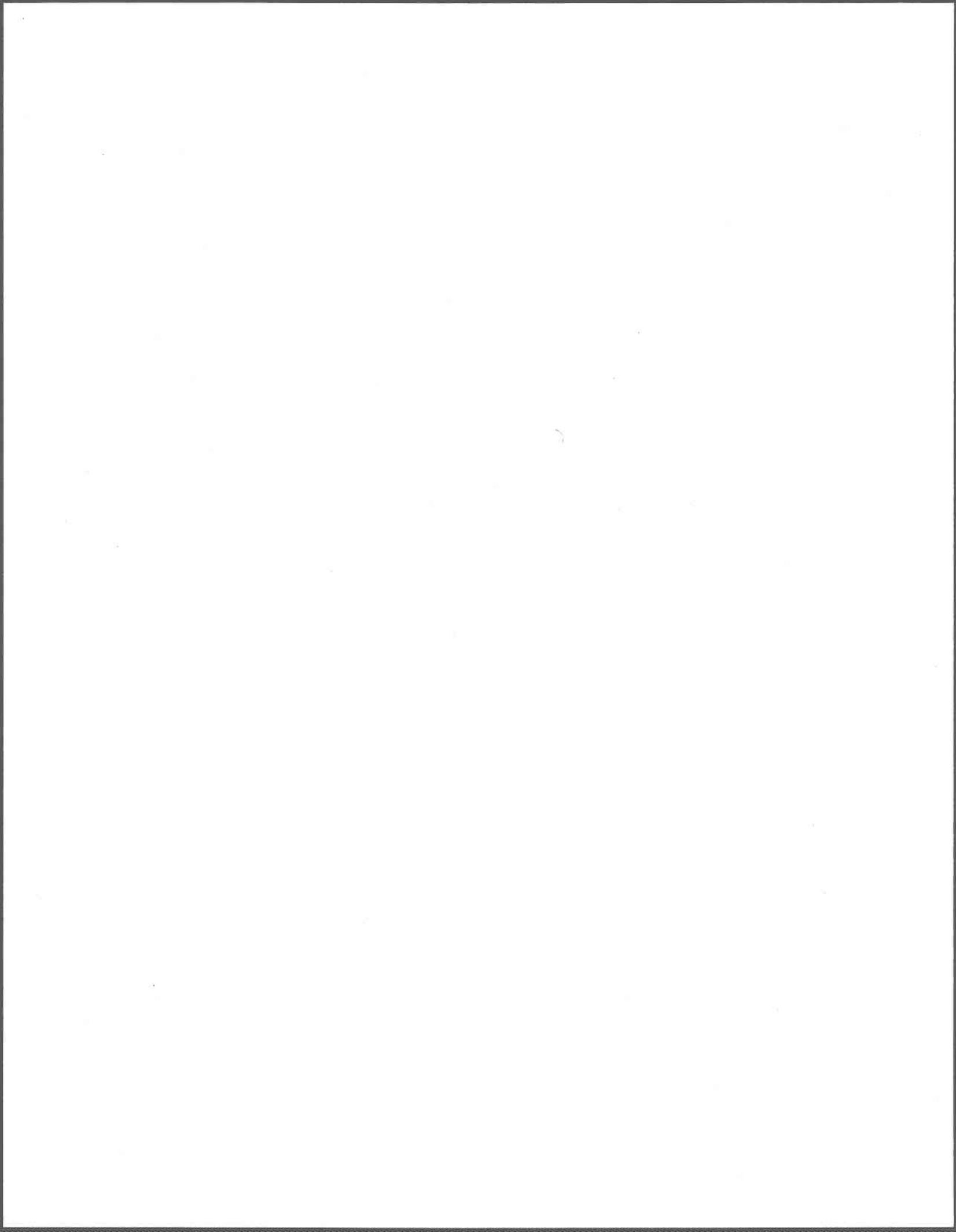


Figure 6.17 Résultats de modélisation pour différents scénarios de remplacement aléatoire pour la municipalité D



7 CONCLUSION

Les quatre cas d'application présentés dans cette thèse illustrent bien comment un modèle simple à trois paramètres permet d'évaluer l'état présent et futur des conduites d'aqueduc à partir de données existantes ou faciles à obtenir. L'indicateur de l'état structural choisi est le nombre annuel de bris répertoriés sur un réseau. Bien que ce ne soit pas un indicateur parfait, le nombre annuel de bris répertoriés est sans aucun doute symptomatique de l'état réel du réseau. En effet, le vieillissement des conduites en fonte grise et en fonte ductile se traduit par la fragilisation de la structure à mesure que les parois sont rongées par la corrosion. Éventuellement, les forces exercées sur la conduite excéderont la résistance du matériau et il y aura bris. Puisque les municipalités n'archivent leurs bris de façon systématique que depuis quelques années, tout effort de modélisation pour évaluer l'état structural présent et futur de réseaux réels devra composer avec de court historique de bris.

Notre choix de modélisation est fortement inspiré des travaux d'Eisenbeis (1994), puisque nous utilisons le nombre de bris comme indicateur de l'état structural d'un réseau d'aqueduc, l'analyse de survie comme technique mathématique pour modéliser les temps de survie, la distribution de Weibull pour le temps de survie entre la pose et le premier bris et une distribution exponentielle pour les bris subséquents et nous prenons en compte, dans le cas des municipalités A et C, un facteur de risque autre que le temps. Mais contrairement à Eisenbeis (1994), nous n'avons pas accès à un historique de bris couvrant plusieurs décennies, donc il nous est impossible de développer un modèle général basé sur un modèle de Cox et de transposer les paramètres du modèle par classe de facteurs de risque à une municipalité à court historique de bris. Nous avons plutôt développé une approche formelle de calage basée sur la fonction de vraisemblance associée au modèle retenu (W-E) parfaitement adaptée aux municipalités à court historique de bris. C'est l'aspect le plus original de la thèse.

Puisqu'il n'est pas possible avec de courts historiques de bris de diviser les données par classe de facteurs de risque et d'ainsi prendre en compte le fait que différents groupes de tronçons vieillissent en moyenne de façon différente, il est alors judicieux de combiner les efforts de modélisation avec une analyse descriptive détaillée des données à notre disposition. L'avantage certain de la démarche de modélisation proposée (par rapport à l'analyse descriptive) est qu'elle permet d'estimer le nombre annuel de bris futurs sur un réseau et de quantifier l'impact de divers scénarios de remplacement sur ce nombre de bris. Par

contre, elle ne permet pas d'identifier les facteurs de risque (autres que ceux liés à la période d'installation). L'analyse descriptive (*e.g.* nombre de tronçons par classe, nombre de bris par classe, identification des facteurs de risque) permet d'enrichir considérablement la réflexion du gestionnaire lors de la planification et de la priorisation des interventions.

L'analyse descriptive des quatre municipalités à l'étude a permis d'identifier les caractéristiques des conduites qui ont le plus grand impact sur le taux de bris. Ce sont principalement les conduites de petits diamètres (moins de 0.2 m), en fonte grise, installées durant la période [1961, 1975] qui brisent le plus souvent pendant la période archivée. Il est probable que les bris soient plus souvent répertoriés sur les conduites de petits diamètres car celles-ci deviennent plus fréquemment inopérantes à cause d'un bris. Les conduites de grands diamètres peuvent avoir plusieurs fuites et être toujours en service. Les conduites en fonte grise sont les plus nombreuses sur les réseaux étudiés et elles sont aussi les plus âgées. La période d'installation, quant à elle, reflète l'âge des tronçons au moment de l'analyse ainsi que les spécificités locales associées aux techniques d'installation, aux techniques de manufacture, aux types de matériaux, etc.

Dans un contexte de détérioration des conduites métalliques due à la corrosion interne et externe des parois, une modélisation basée sur l'analyse de survie regroupant tous les tronçons (par opposition à par classe de tronçons) produira nécessairement plus de bris sur les conduites plus âgées. Pourtant, nous constatons dans cette étude que ce ne sont pas les tronçons les plus âgés qui brisent le plus mais bien ceux posés durant la période [1961-1975]. Pour modifier ce comportement du modèle, il faut diviser les tronçons par classe de période d'installation. Dans le contexte de courts historiques de bris, il n'est possible de diviser les tronçons qu'en deux classes afin d'obtenir des échantillons par classe (nombre de tronçons et de bris associés) de taille statistiquement significative. Une analyse plus poussée des données des municipalités A et C a permis d'identifier plus finement la division des tronçons nécessaire pour reproduire au mieux le comportement observé en terme de bris, soit les tronçons installés avant et après 1960. En effet, les tronçons posés après 1960 se comportent moins bien que ceux posés avant. Ce comportement a été pris en compte lors de la modélisation par deux jeux de paramètres de calage. Il est à noter qu'ainsi, les tronçons de la période récente sont regroupés avec ceux, plus à risque, de la période [1961-1975]. Regrouper les tronçons de la période récente avec ceux de la période [1961-1975] ou avec ceux posés avant 1960 aura peu d'impact sur les résultats de modélisation. De plus, puisque nous ne

possédons que peu d'information sur le vieillissement moyen de ces tronçons, il est impossible de déterminer s'il est préférable de les regrouper avec l'un ou l'autre de ces groupes. Nous avons fait le choix de les regrouper avec ceux de la période [1961-1975] afin de grossir la taille de l'échantillon.

La stratégie de calage a permis d'obtenir les valeurs optimales des paramètres de calage qui maximisent la fonction de vraisemblance. Les résultats obtenus sont tous dans une plage de valeurs comparables à celles obtenues par Eisenbeis (1994). La seule exception est la municipalité B où le paramètre p est inférieur à 1, ce qui a nécessité une analyse plus poussée. L'hypothèse émise est que la durée de la période archivée était trop courte pour obtenir des valeurs de paramètres de calage qui permettent de reproduire adéquatement les nombres annuels de bris pour cette municipalité. De fait, la municipalité B est celle dont l'historique est le plus court (7 ans pour un réseau vieux de 85 ans, donc 8%). Le modèle W-E avec deux jeux de paramètres (avant et après 1960) a permis de reproduire au mieux la tendance générale du nombre annuel de bris pour les municipalités A et C. Les résultats de modélisation obtenus pour la municipalité D porte à croire que la durée de la période archivée est tout juste au-dessus du seuil acceptable, puisque le modèle sous-estime légèrement les nombres annuels de bris.

Le modèle développé a aussi permis de prédire la tendance des nombres annuels de bris dans le futur et d'évaluer l'impact de différents scénarios de remplacement. Le taux de remplacement requis pour maintenir le niveau de bris dans 20 ans à un niveau comparable à ce qu'il était en 1996, sans pose de nouveaux tronçons après 1996, est de 1.4% annuellement pendant 20 ans pour la municipalité A en faisant du remplacement aléatoire et 1.0% pour du remplacement prioritaire. Le remplacement prioritaire permet de choisir dans la gamme des tronçons ayant déjà brisé, ceux qui font partie du groupe à risque selon leur période d'installation (dans ce cas-ci, ceux posés après 1960). Il est de 2.3% pour la municipalité C en faisant du remplacement aléatoire et 1.8% pour du remplacement prioritaire. Il est de 0.4% pour la municipalité B (sous toute réserve, compte tenu des résultats de modélisation) et de 1.5% pour la municipalité D. Évidemment, un gestionnaire de réseau devra consentir un effort plus grand s'il désire améliorer l'état structural des réseaux par rapport à ce qu'il était en 1996. Il est à noter qu'un scénario de stabilité représente un maintien du personnel et des équipements d'intervention dans les années futures. À cause de l'incertitude liée au comportement des tronçons posés lors de la période récente en terme de vieillissement moyen, il est plus sage de limiter l'analyse prédictive aux vingt prochaines années. Au delà de ce terme, l'exercice perd de son sens.

Un **bon modèle opérationnel** pour estimer les taux de bris présents et futurs sur un réseau d'aqueduc peut servir d'**outil de diagnostic** pour identifier les caractéristiques des conduites qui ont la plus grande influence sur le taux de bris et peut aussi grandement améliorer la **performance des outils de planification des interventions** servant à identifier les meilleures stratégies d'intervention. En effet, un outil d'aide à la décision efficace pour la planification des interventions permet aux gestionnaires de réseau de choisir entre plusieurs interventions et d'estimer le temps optimal pour intervenir sur chacune des conduites du réseau (*e.g.* Kleiner et al., 1998a et 1998b). L'efficacité d'un tel outil repose sur une modélisation adéquate de la détérioration de l'intégrité structurale des conduites. Afin de sortir du cadre purement théorique de l'optimisation des interventions, il est nécessaire de développer des modèles qui prennent en compte le peu de données disponibles dans la plupart des municipalités. De plus, bien que le coût de réhabilitation d'une conduite soit moins élevé que le coût de remplacement, l'impact de la réhabilitation sur le temps de survie dépend de la méthode utilisée (*e.g.* tubage, chemisage) et est peu documenté. Il serait intéressant de pouvoir prendre en compte plusieurs types d'intervention mais avec les données actuellement disponibles, cela s'avère difficile.

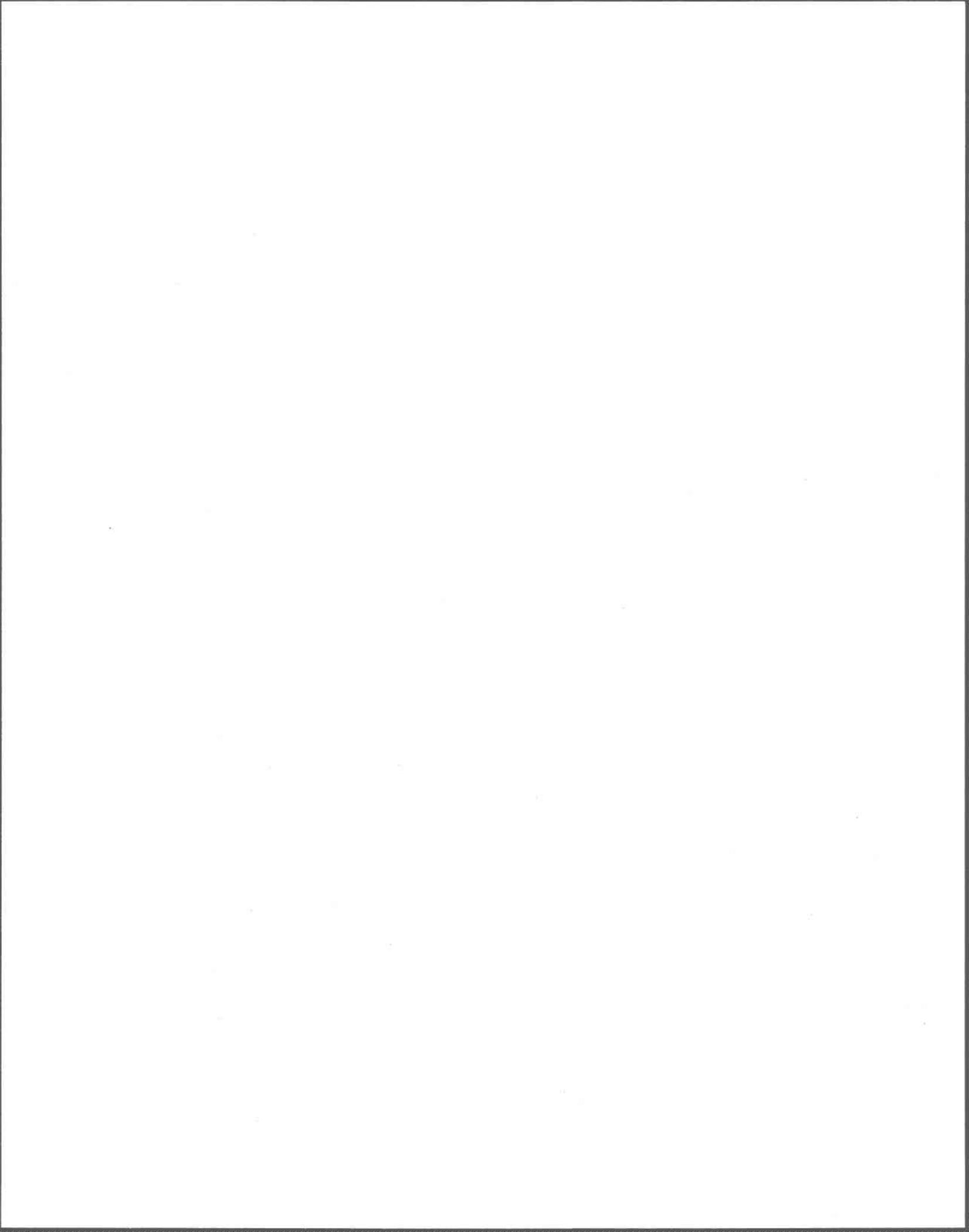
Recommandation pour recherche future

Il serait fort intéressant de pousser plus loin l'analyse sur l'impact de la durée de la période archivée sur la qualité du calage. En effet, une analyse de sensibilité pourrait être effectuée afin de déterminer le pourcentage-seuil de la durée de la période archivée par rapport à l'historique complet du réseau permettant de reproduire adéquatement la tendance générale des nombres annuels de bris sur un réseau. Ce problème est intimement lié aux nombres de bris répertoriés pendant la période d'archivage et au pourcentage de bris qu'il est possible d'associer aux tronçons sur lesquels ils ont eu lieu.

De plus, il serait intéressant d'évaluer l'impact de la longueur moyenne des tronçons sur l'estimation de la valeur des paramètres de calage. En effet, plus la longueur moyenne des tronçons est courte, plus il y aura de premiers bris sur le réseau et moins il y aura de bris subséquents. Certains chercheurs (*e.g.* Eisenbeis, 1994) ont observé que les taux de bris varient en fonction de la racine carrée de la longueur. En fait, s'il était possible de localiser les bris au niveau de la conduite (d'environ 6 mètres de long) plutôt que du tronçon (d'environ une centaine de mètres de long), les nombres de premiers bris et de bris subséquents seraient fort différents, ce qui devrait avoir un impact sur la valeur des paramètres de calage.

Malgré le fait que le tronçon est la plus petite unité spatiale de localisation des bris possible dans cette étude, il serait intéressant d'estimer la longueur de la "zone d'influence" de détérioration des conduites en analysant la proximité des bris dans l'espace et dans le temps avec une méthodologie similaire à celle employée par Goulter et Kazemi (1988).

Il serait aussi intéressant d'utiliser la stratégie de calage pour les autres modèles présentés au Tableau 6.10 avec les données de la municipalité C. De plus, malgré la quantité limitée de données à notre disposition, il serait intéressant d'appliquer le modèle de Cox en discriminant avec un seul facteur de risque à la fois, par exemple : par diamètre puis par type de matériau. Évidemment, l'application du modèle de Cox exige d'abord une étude théorique afin de déterminer comment ce modèle peut être utilisé dans le contexte des courts historiques. Afin d'augmenter la quantité de données disponibles pour réaliser les analyses suggérées précédemment, il pourrait être avantageux de grouper les données des quatre municipalités à l'étude. Il n'est pas clair pour l'instant quel serait l'impact d'un tel regroupement. Bien sûr, l'intégration du modèle proposé dans un outil d'aide à la décision pour la planification des interventions est l'aspect le plus pratique et souhaitable qui puisse être proposé.



APPENDICE A
STRUCTURATION DES TABLES
AQUEDUC ET BRIS
POUR LES QUATRE CAS D'APPLICATION



APPENDICE A

STRUCTURATION DES TABLES AQUEDUC ET BRIS POUR LES QUATRE CAS D'APPLICATION

A.1 La table AQUEDUC

La table 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 cette table, 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 sont de bonne qualité. Par exemple, sachant que la pression joue un rôle dans le phénomène des bris (Clark et al., 1988), 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 qui ait un impact significatif 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 A.1 présente les informations telles qu'elles apparaissent dans la table 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 la table AQUEDUC doit être égale 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 la table 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" peuvent 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 A.1 Exemple de la structure de la table AQUEDUC

Numéro de tronçon	Numéro de secteur	Nom de la rue au-dessus	De	À	Diamètre	Longueur	Type de matériau	Année de pose	Type de sol	Occupation du sol	Autres données disponibles
Numéro unique	Optionnel	Localisation du tronçon									

A.2 La table BRIS

La table BRIS contient l'historique des bris. Le Tableau A.2 présente les informations telles qu'elles apparaissent dans la table "BRIS". 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 incorrectes, d'une charge excessive accidentelle en surface, ou encore de conditions d'opérations non-favorables.

Les bris sont le plus souvent localisés par l'adresse civique et le nom de la rue sur lesquels ils ont eu lieu. Par exemple, à la Figure 3.1, les deux bris illustrés seraient localisés, l'un en face du 1610, boulevard Villeneuve, et l'autre en face du 1620, boulevard Villeneuve. Les deux bris seraient associés au tronçon #2. 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 fine 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 que les bris

apparaissent parfois de façon progressive). Il est à noter que l'information notée dans la table BRIS ne permet pas de la lier à la table AQUEDUC puisque cette dernière ne contient aucune référence aux adresses civiques.

Tableau A.2 Exemple de la structure de la table BRIS

Date du bris	Numéro civique	Nom de la rue	Nom de la rue à l'intersection	Autres données disponibles (e.g. type de bris)
JJ/MM/AAAA	Localisation			

A.3 Lien entre les deux tables

Pour établir un lien entre la table AQUEDUC et la table BRIS, il faut qu'une information commune aux deux tables permette de 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 généralement localisés en référence à la voirie (e.g. numéro civique et nom de la rue : 1610, boulevard Villeneuve) par des équipes des Travaux Publics. Dans les tables AQUEDUC, les conduites sont habituellement localisées 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 le boulevard Villeneuve, entre les rues Mailhot et Duchesne). Il n'y a aucune référence aux numéros civiques. Par exemple, il n'est pas possible avec les informations disponibles de savoir si le 1610, boulevard Villeneuve est situé entre les rues Mailhot et Duchesne. Le but recherché est de lier le bris du 1610, boulevard Villeneuve au tronçon unique (identifié par un numéro unique, e.g. à la Figure 3.1, le tronçon #2) situé sous le boulevard Villeneuve entre les deux rues où se trouvent le 1610.

Deux options sont possibles pour lier les deux tables : (1) ajouter les numéros civiques correspondant à chaque tronçon dans la table AQUEDUC; ou (2) ajouter le numéro unique de tronçon correspondant à chacun des bris dans la table BRIS. Pour la première option, il faut connaître les numéros civiques pairs

et impairs au début et à la fin de chaque tronçon d'aqueduc. Une fois entrés dans la table AQUEDUC, une requête peut être programmée pour identifier le tronçon unique correspondant à chacun des bris localisés par une adresse civique. Pour que la requête puisse être exécutée avec succès, il faut que les noms de rues soient entrés de la même façon dans les deux tables. Par exemple, un nom de rue comme "Boulevard Villeneuve" peut être écrit de plusieurs façons : avec ou sans lettres majuscules, ou encore avec différentes abréviations, telles "blvd" ou "boul.". La plupart des municipalités possèdent une liste de la toponymie des noms de leurs rues, bien que pour les quatre cas d'application, la toponymie n'était pas respectée dans les deux tables de données. Pour les bris qui ne sont pas localisés par une adresse civique, le travail doit être fait à la main. Cette première option a l'avantage de permettre une mise à jour automatique lorsque de nouveaux bris s'ajoutent, sans que cela n'affecte la façon dont les bris sont localisés sur le terrain. Le désavantage majeur est l'effort exigé pour entrer les numéros civiques, en supposant que ces informations sont disponibles dans les municipalités.

La seconde option, qui est d'entrer le numéro unique de tronçon pour chacun des bris dans la table BRIS, a l'avantage d'être moins exigeante en temps que la première option lorsque le nombre de bris est beaucoup plus petit que le nombre de tronçons, ce qui est habituellement le cas pour les municipalités à faible historique de bris. Le désavantage majeur est que la mise à jour ne peut être effectuée de façon automatique.

Dans les quatre cas d'application, un cas fréquemment rencontré était celui des bris à une intersection, *i.e.* un bris localisé par deux noms de rue. Le bris peut avoir eu lieu sur chacun des deux tronçons de part et d'autre de la rue transversale. Il n'y a aucun moyen d'identifier le "bon" tronçon. Lorsque les deux tronçons ont les mêmes caractéristiques, le bris peut être associé à l'une ou l'autre sans que cela n'ait un impact pour l'analyse descriptive. Par contre, pour l'analyse prédictive, le fait de choisir l'un des deux tronçons aura un impact sur le nombre de bris associé au tronçon. Puisque le nombre total de bris est déjà restreint dans les quatre cas d'application, nous avons choisi d'associer arbitrairement ces bris à l'un des tronçons. L'impact de cette décision sur les résultats de la modélisation est inconnu.

A.4 Municipalité A

La table originale du réseau d'aqueduc fournie par le gestionnaire de la municipalité A a été structurée pour les besoins du réseau de voirie, donc la définition de "tronçon" n'était pas la même que celle dont nous avons besoin. Puisque toutefois les tronçons de rue se trouvent à découper le réseau d'aqueduc en tronçons généralement homogènes, la structure de base de la table a été respectée. Par contre, la table a dû être modifiée pour inclure de nouveaux tronçons et certains ont été exclus. 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 (les caractéristiques de l'aqueduc et non de la voirie doivent être 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 le fait qu'il n'y ait qu'un seul aqueduc. La table originale contenait les informations suivantes : (1) numéro d'identification du tronçon; (2) nom de la rue au-dessus; (3) nom de la rue au début du tronçon; (4) nom de la rue à la fin du tronçon; (5) longueur du tronçon; et (6) date d'ouverture de rue (année d'installation du tronçon).

Pour compléter cette table afin qu'elle 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 des 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 de la ville, 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 géo-référencées mais plutôt de type graphique, ce logiciel permettait de visualiser l'information sans toutefois pouvoir établir un lien avec la table de données sur les tronçons. Cet inconvénient majeur a exigé beaucoup de travail.

Les diamètres de tous les tronçons d'aqueduc ont été récupérés à partir de cartes MapInfo. Environ 97% des longueurs étaient déjà dans la table originale mais les modifications apportées à cette table ont nécessité que l'autre 3% des longueurs soient mesurées à partir des cartes MapInfo. La date d'ouverture de rue (synonyme d'âge ou encore d'année d'installation) était aussi dans la table originale 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=Résidentiel; 2=Commercial; 3=Industriel; 4=Agricole). 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 à partir d'une règle liant la date d'ouverture de rue et le type de matériau (<1970=fonte grise; 1970-1982=fonte ductile; >1982 et diamètre>12"=fonte ductile; >1982 et diamètre<12"=PVC). Les années de transition 1970 et 1982 sont bien connues, mais il se peut qu'un stock de conduites de fonte grise ou de fonte ductile ait été utilisé après ces années.

La table originale des bris contenait 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 (21 ans de données). 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 à la table d'aqueduc. Ainsi, des requêtes informatiques ont permis de créer un lien automatisé entre la table 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 à la table aqueduc, il sera possible d'utiliser une requête pour associer un numéro unique de tronçon à un bris futur.

Plusieurs cas à problème ont été identifiés : 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 à problème ont été soumis au gestionnaire de réseau, certains ont pu être réglés, d'autres ont dû être mis de côté.

A.5 Municipalité B

La table originale du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de réseau de la municipalité B contenait les informations suivantes : (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, ce qui est exceptionnel. Pour compléter la table originale, une autre table contenant la correspondance entre les numéros de rues et les noms de rues a été utilisée. 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. Le type de sol a été identifié grossièrement comme de l'argile pour toute la municipalité.

La table originale des bris contenait les données suivantes: (1) nom de la rue; (2) numéro civique; (3) date du bris, AAAA/MM/JJ. L'historique des bris couvre la période 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 la table du réseau d'aqueduc avec une requête. Un numéro de tronçon unique a été associé avec environ la moitié des bris. Pour l'autre moitié des bris, le gestionnaire de réseau a associé manuellement la majorité de ces cas à un numéro unique de tronçon d'aqueduc.

A.6 Municipalité C

La table originale du réseau d'aqueduc fourni par le gestionnaire de réseau de la municipalité C contenait les informations suivantes : (1) nom de la rue au-dessus du tronçon; (2) nom de la rue au début du

tronçon; (3) nom de la rue à la fin du tronçon; (4) diamètre; (5) longueur; et (6) un numéro du secteur de bornes-fontaines. 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}).

En gros, la municipalité C est divisée en quatre secteurs qui suivent les anciennes limites des quatre villages formant la municipalité actuelle. Chaque secteur est divisée en sous-secteurs de bornes-fontaines (utilisés par les Travaux Publics). Au total il y a 71 sous-secteurs. Pour la localisation de ces secteurs sur les feuillets de la municipalité, nous devons regarder les similitudes géométriques 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.

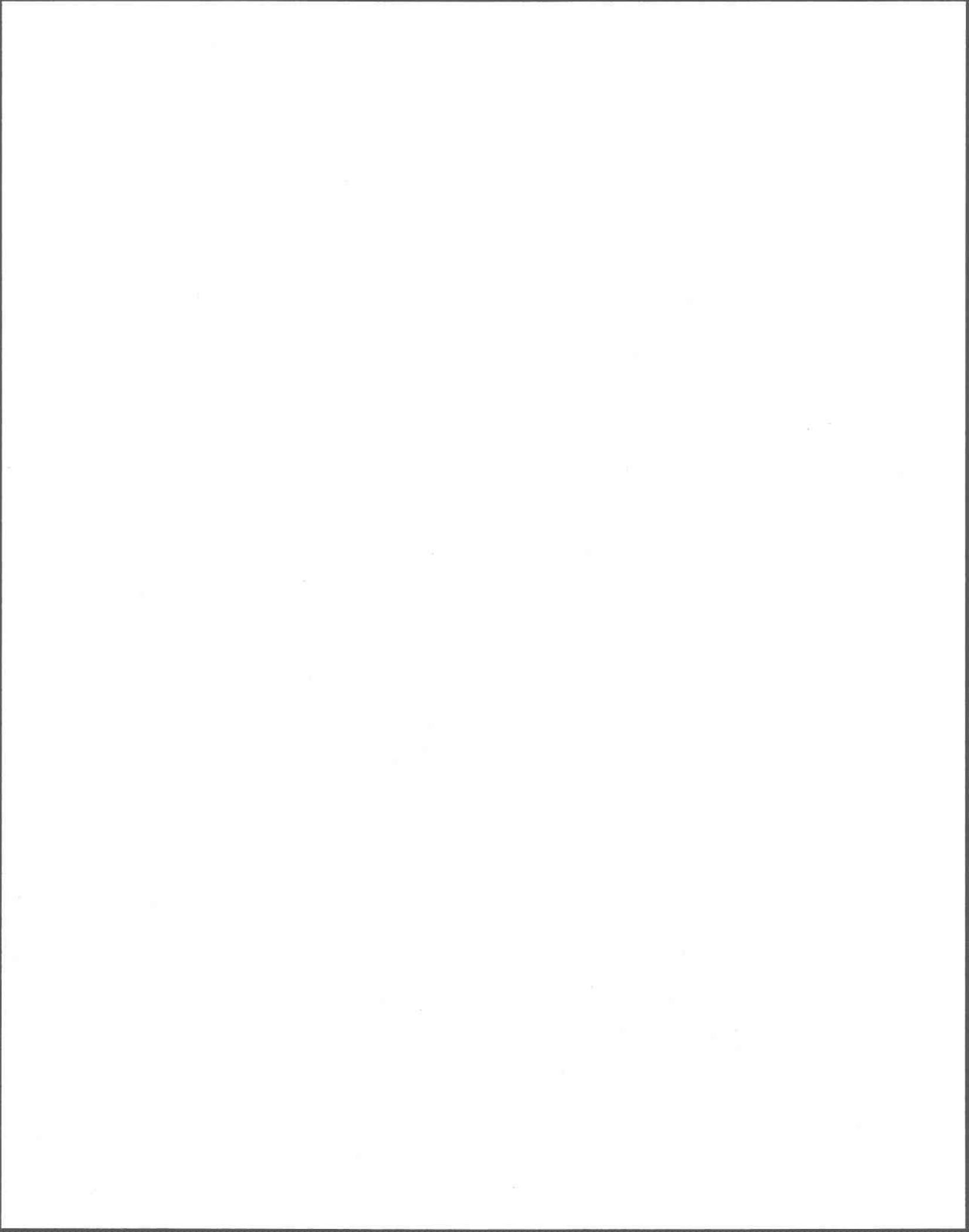
De plus, pour compléter la table, nous avons dû ajouter un numéro de tronçon, l'âge, le type de matériau, de sol et d'occupation du sol. Le numéro de tronçon est composé du numéro de secteur et d'un identifiant de deux chiffres (*e.g.* 101-02). Pour connaître les âges (années d'installation), nous nous 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 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, 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.

La table originale des 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) année du bris, AA; (5) mois du bris, MM; (6) jour du bris, JJ; et (7) numéro du secteur de bornes-fontaines. L'historique des bris remonte à 1981 jusqu'en 1995. 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 la majorité des 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 mis de côté.

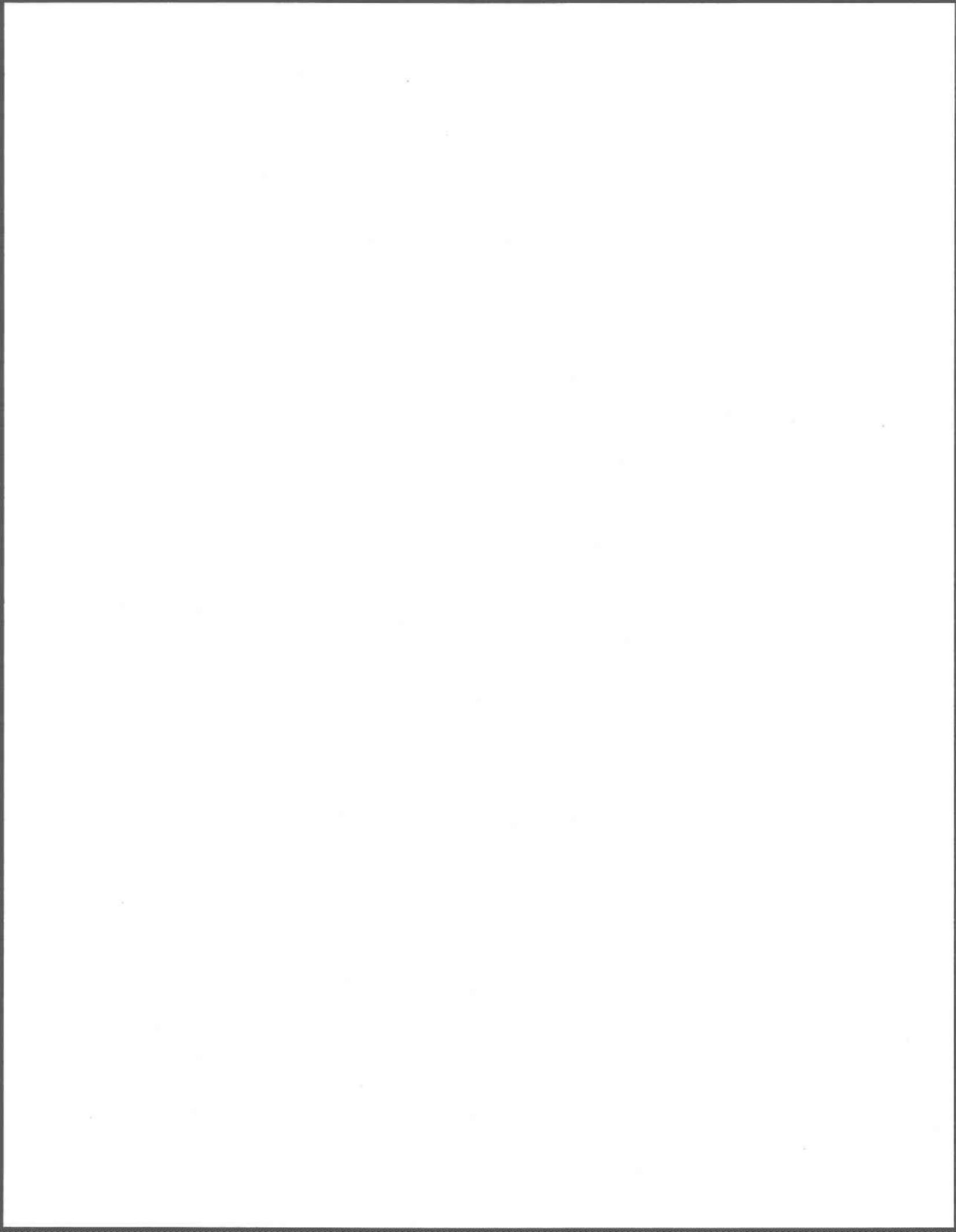
A.7 Municipalité D

La municipalité D 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; et (7) âge. 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. 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 ses connaissances de la municipalité. La base de données des bris telle que fournie par le gestionnaire de réseau contenait: (1) numéro de fuite; (2) noeuds; (3) secteur; (4) date; (5) numéro de tronçon; (6) numéro civique; et (7) nom de la rue. Le numéro de tronçon était déjà inclus dans la table de bris et après vérification, la très grande majorité des bris était associée à un tronçon (dans quelques cas, ce champ était laissé vide).



APPENDICE B

**STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE BASE
POUR LES QUATRE CAS D'APPLICATION**



APPENDICE B

STATISTIQUES DESCRIPTIVES DE BASE POUR LES QUATRE CAS D'APPLICATION

B.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. La table AQUEDUC utilisée pour le calcul des statistiques de base contient 2096 tronçons et la table BRIS, 1719 bris pour la durée de l'historique de 21 ans. La Figure B.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 B.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 B.3 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une grande majorité de tronçons (84.8%) ont un diamètre compris entre 0.1 et 0.2 m. La Figure B.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 B.5 présente la répartition des longueurs. La très grande majorité des tronçons ont 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 tel qu'illustré à la Figure B.6. La Figure B.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 B.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 (Fougères et al., 1998). 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 B.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 aient 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 B.10 montre le nombre et le pourcentage de tronçons selon le type de matériau. La majorité des tronçons sont 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 B.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 B.12 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La grande majorité des tronçons (85.3%) se trouvent 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 B.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 B.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 B.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.

B.2 Municipalité B

La municipalité B dessert une population d'environ 58 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 305 km. La table AQUEDUC contient 2038 tronçons et la table BRIS, 536 bris durant la période d'observation de 7 ans. La Figure B.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 beaucoup plus faible. La Figure B.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 B.18 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (69.2%) ont 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 B.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 B.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 B.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 B.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 durant la période 1945-1960. La Figure B.23 montre le taux de bris par périodes d'urbanisation. Le taux de bris est 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 B.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^{MD}. La Figure B.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 B.26 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La grande majorité des tronçons (89.7%) se trouvent en zone résidentielle. La Figure B.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. Par ailleurs, 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).

B.3 Municipalité C

La municipalité C dessert une population d'environ 93 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 407 km. La table AQUEDUC contient 1554 tronçons et la table BRIS, 1426 bris durant la période d'observation de 16 ans. La Figure B.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 mais à rythme moins rapide. La Figure B.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 0.150 m (6 pouces) et 0.2 m (8 pouces), avec 33.1% et 38.7% des tronçons respectivement. La Figure B.30 présente le nombre et le pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (71.8%) ont 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 B.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 significatif. 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 B.32 présente la répartition des longueurs. La très grande majorité des tronçons ont 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 B.33. La Figure B.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 B.35 présente la répartition des tronçons selon les 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 B.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 B.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 B.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 B.39 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La majorité des tronçons (72.5%) se trouvent en zone de faible densité ou résidentielle. La Figure B.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 B.41 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de sol. La grande majorité des tronçons (90.6%) se retrouvent dans un sol de type argileux. La Figure B.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).

B.4 Municipalité D

La municipalité D dessert une population d'environ 20 000 habitants avec un linéaire de réseau d'aqueduc de 155 km. La table AQUEDUC contient 1806 tronçons et la table BRIS, 279 bris durant la période d'observation de 10 ans. La Figure B.43 présente le nombre total de tronçons dans la municipalité D depuis l'année de pose du premier tronçon en 1949. La municipalité a connu une forte croissance en 1978. La Figure B.44 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 B.45 présente le nombre et le pourcentage de

tronçons par intervalles de diamètres. Une majorité de tronçons (75.6%) ont 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 B.46 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 D est de 86 m. La Figure B.47 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 ont même une longueur inférieure à 200 m (96.7%). La Figure B.48 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 B.49 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 B.50 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 B.51 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 D est la seule dans cette étude à utiliser des tuyaux en amiante. La Figure B.52 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 B.53 présente le nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol. La majorité des tronçons (82.2%) se trouvent en zone de faible densité ou résidentielle. La Figure B.54 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 B.55 montre le nombre et pourcentage de tronçons par type de sol. La majorité des tronçons (73.3%) sont posés sur le roc. La Figure B.56 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).

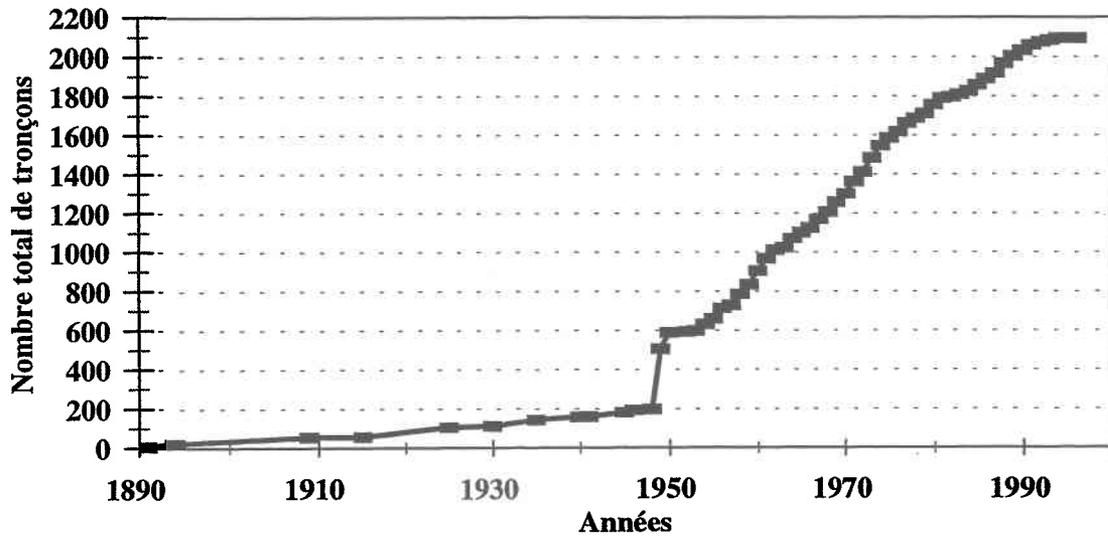


Figure B.1 Croissance de la municipalité A en terme de tronçons

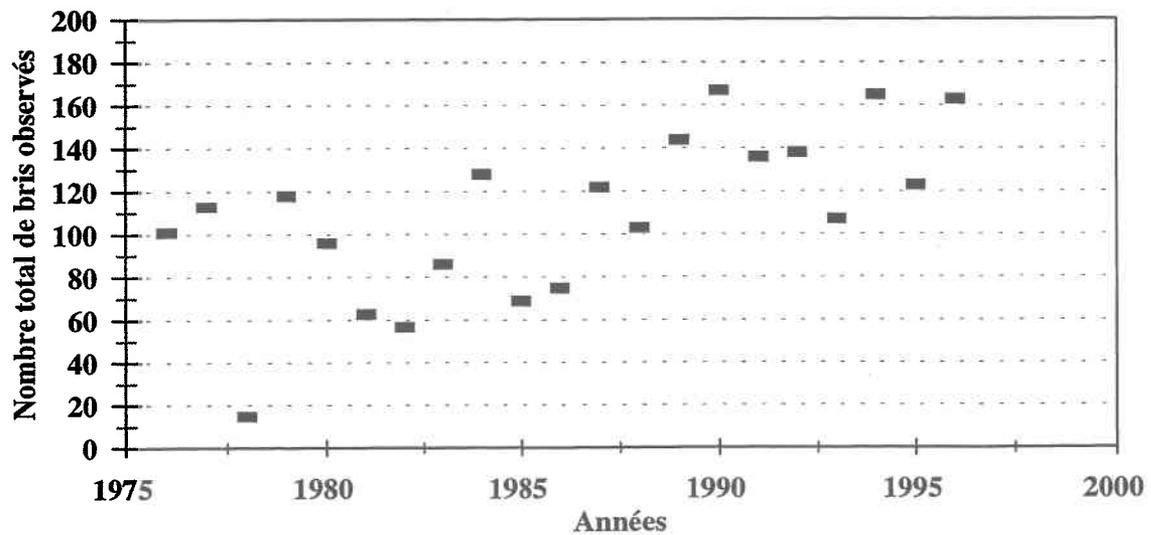


Figure B.2 Historique de bris pour la municipalité A



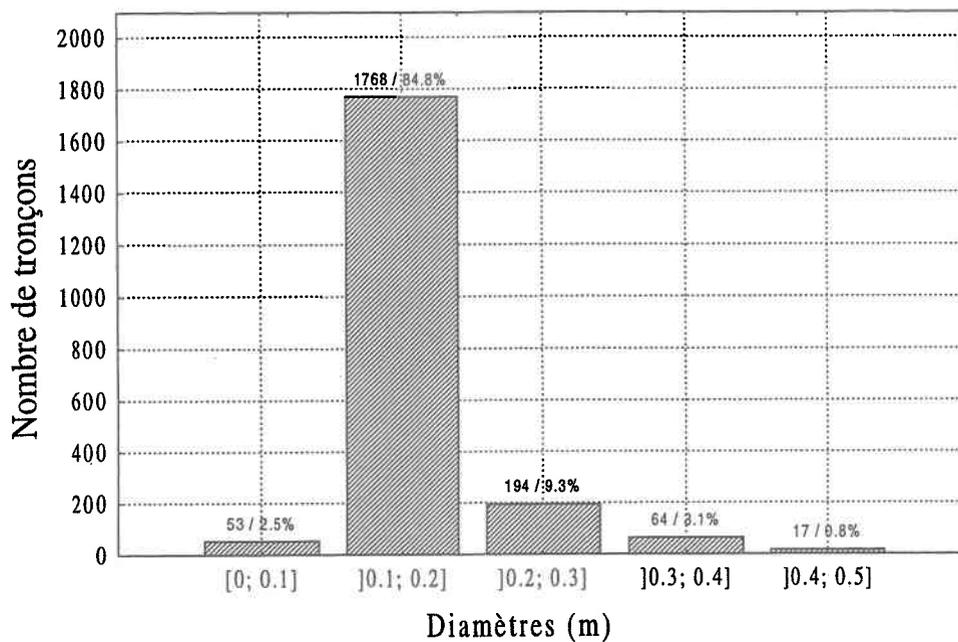


Figure B.3 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité A

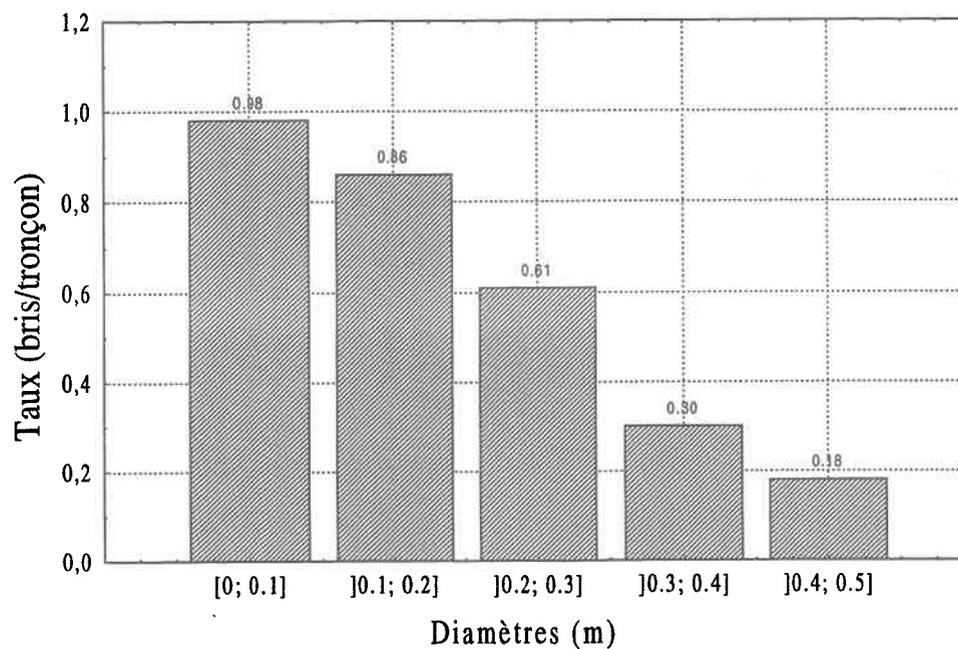
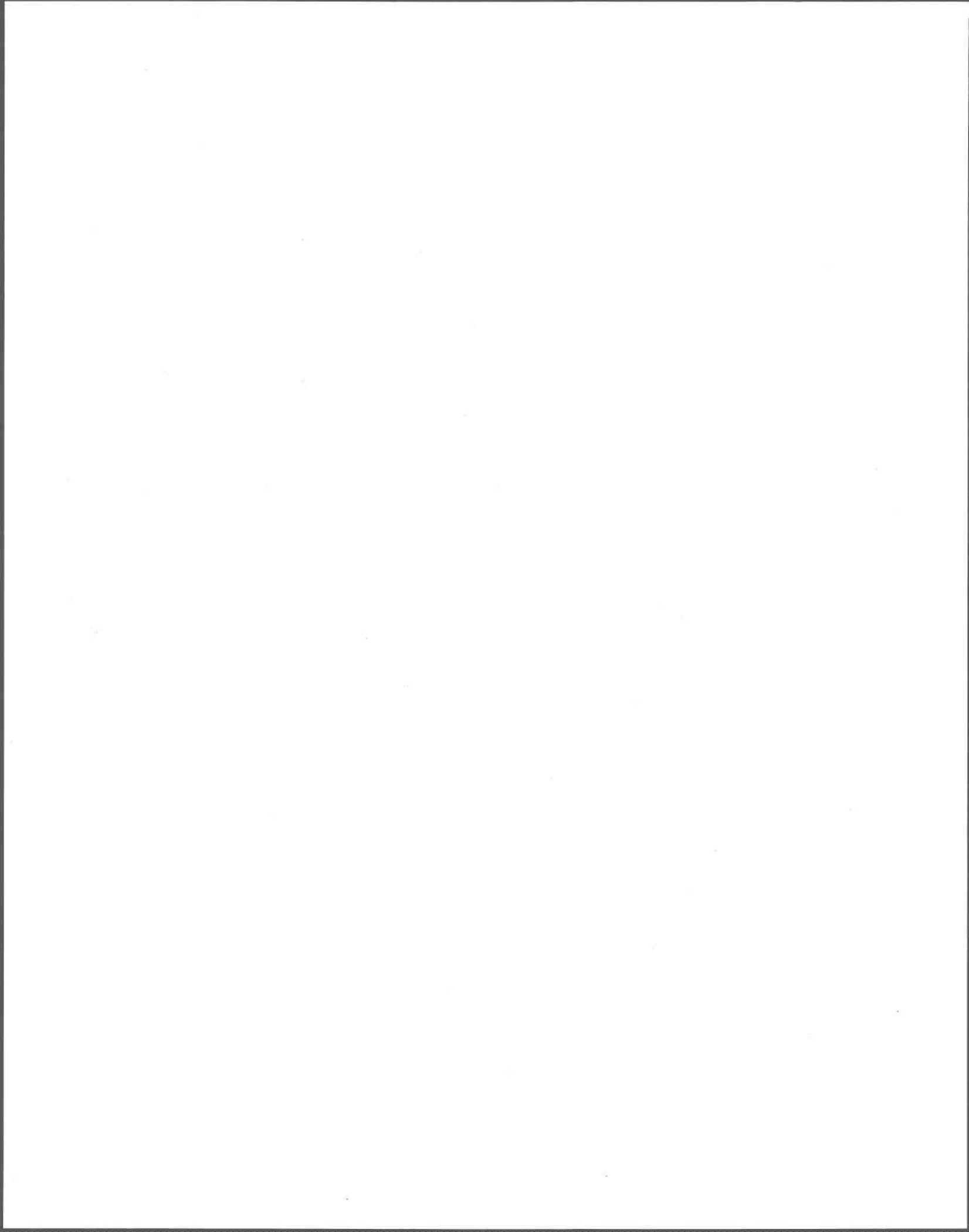


Figure B.4 Taux de bris par intervalles de diamètres dans la municipalité A



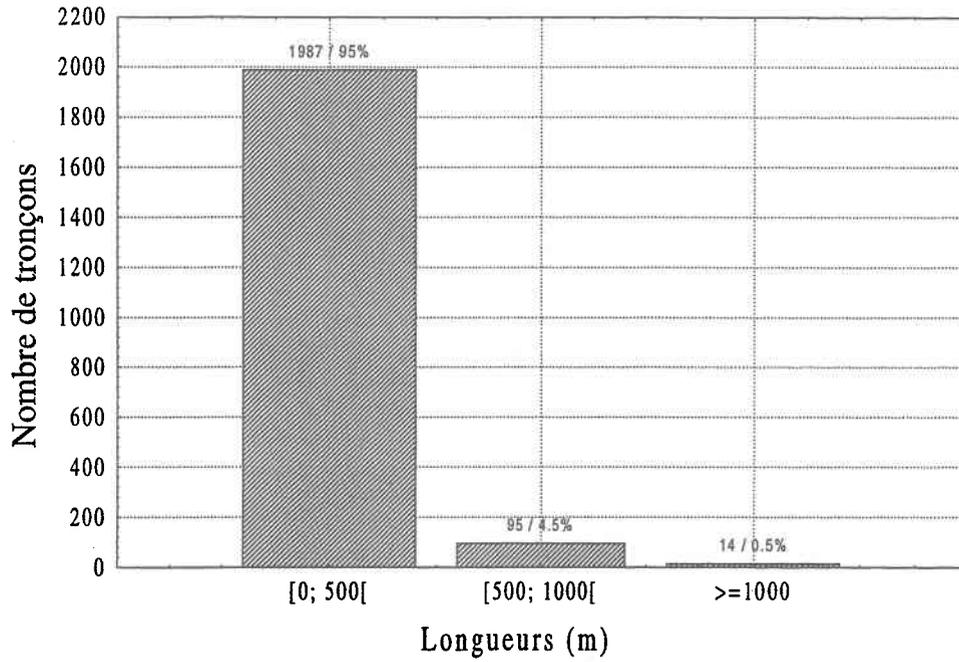


Figure B.5 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité A

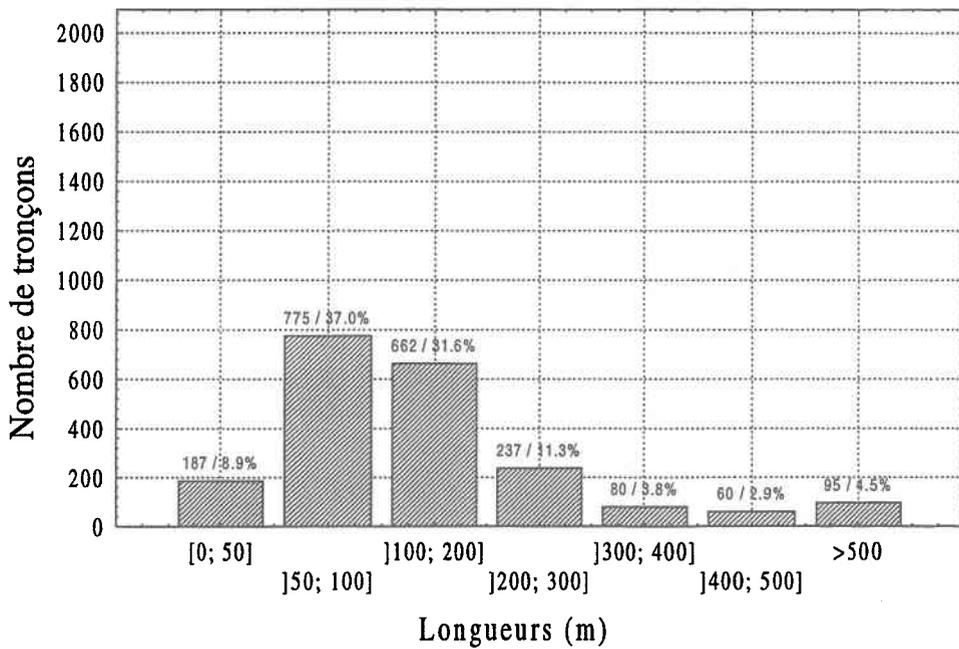
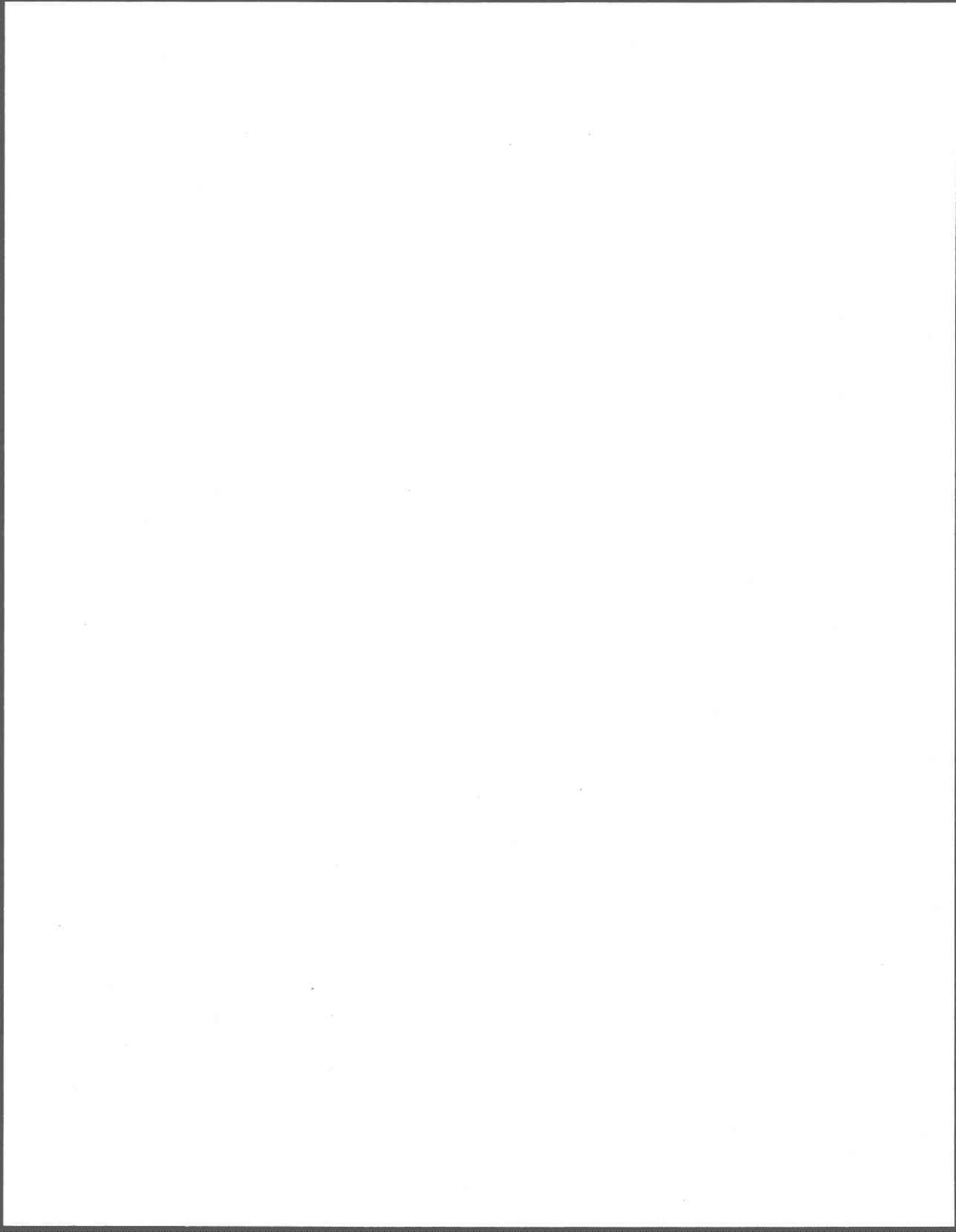


Figure B.6 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité A



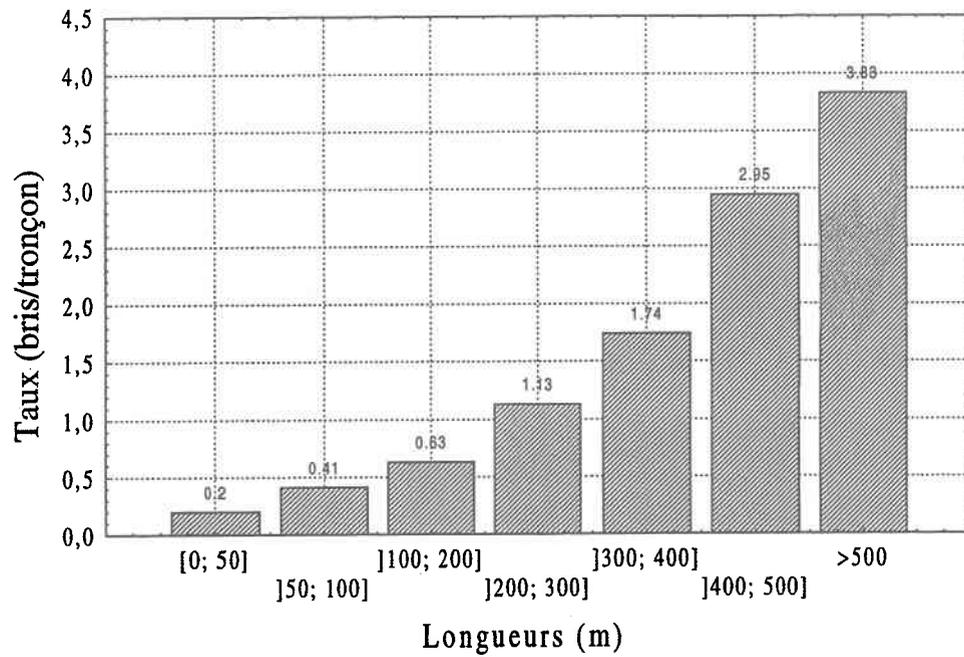
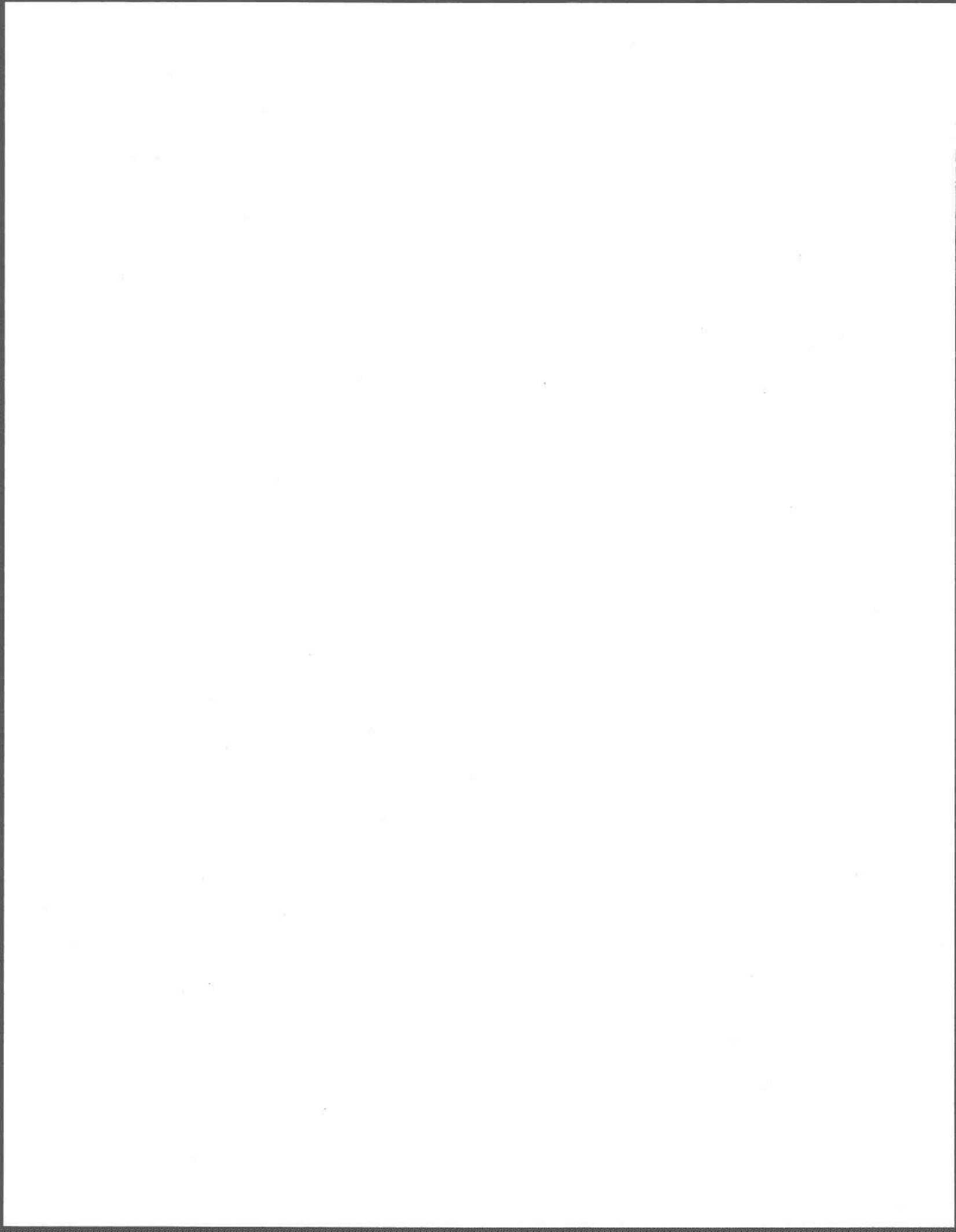


Figure B.7 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité A



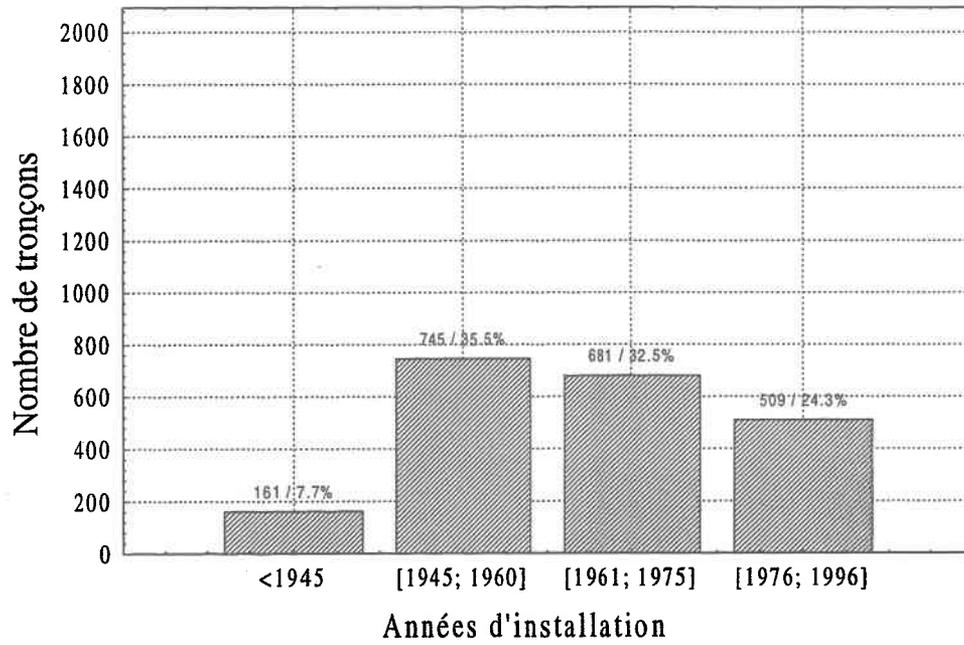


Figure B.8 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité A

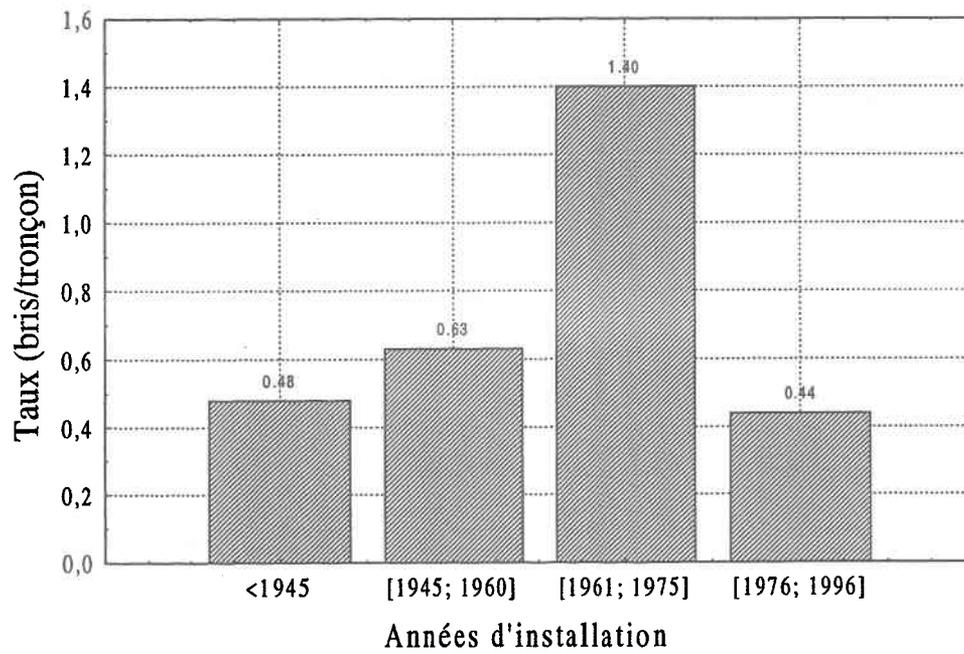
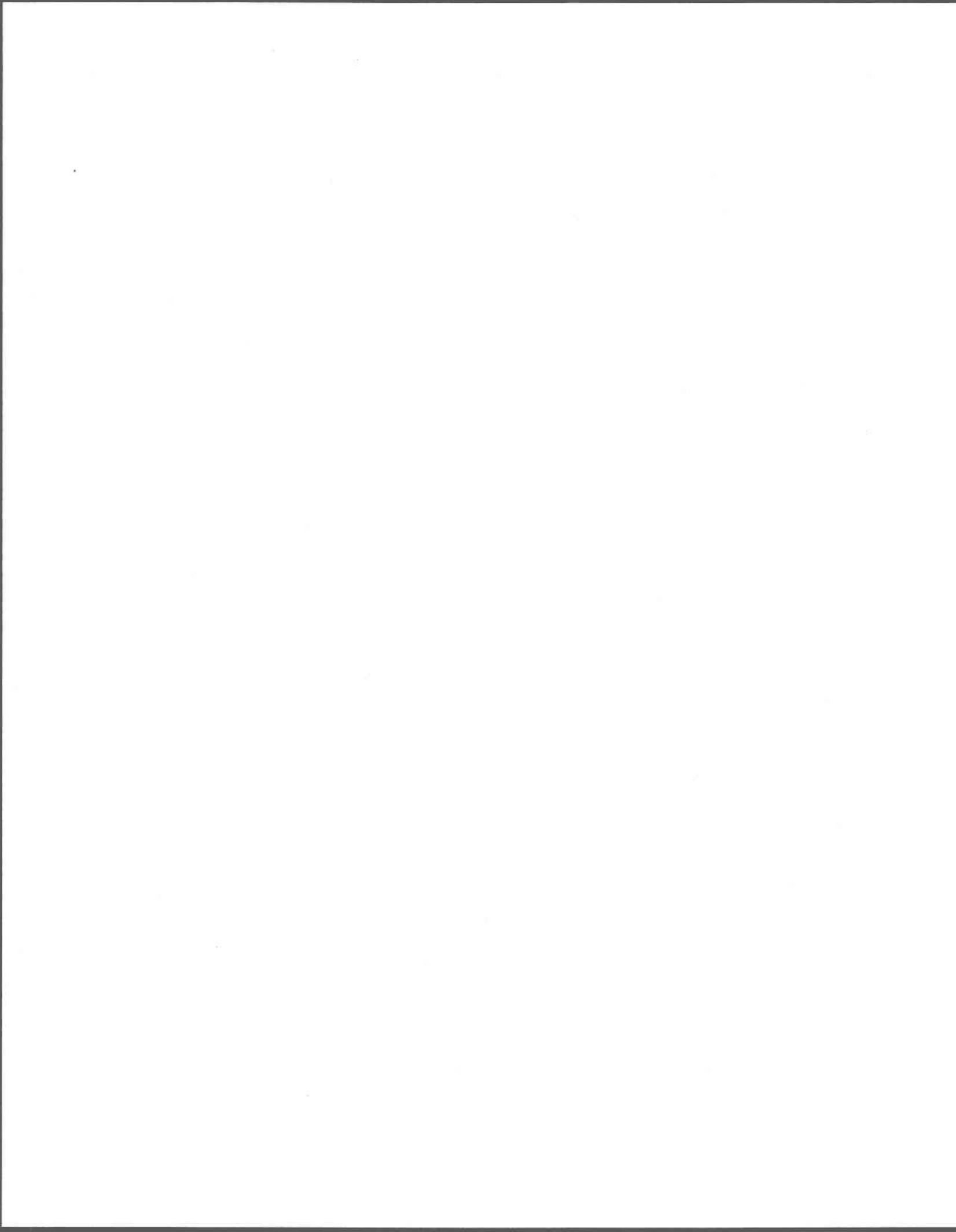


Figure B.9 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité A



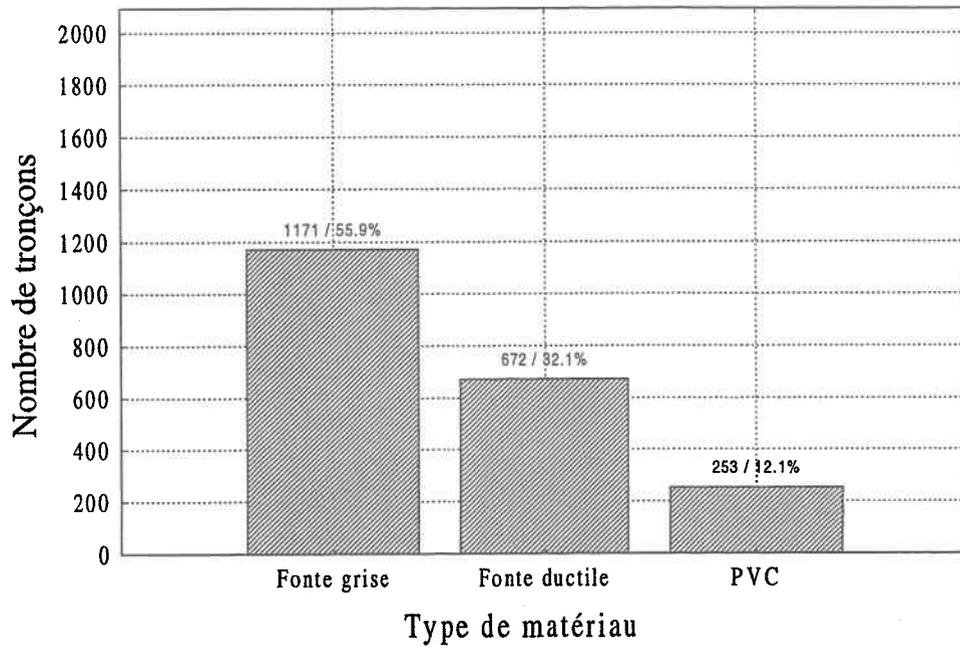


Figure B.10 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité A

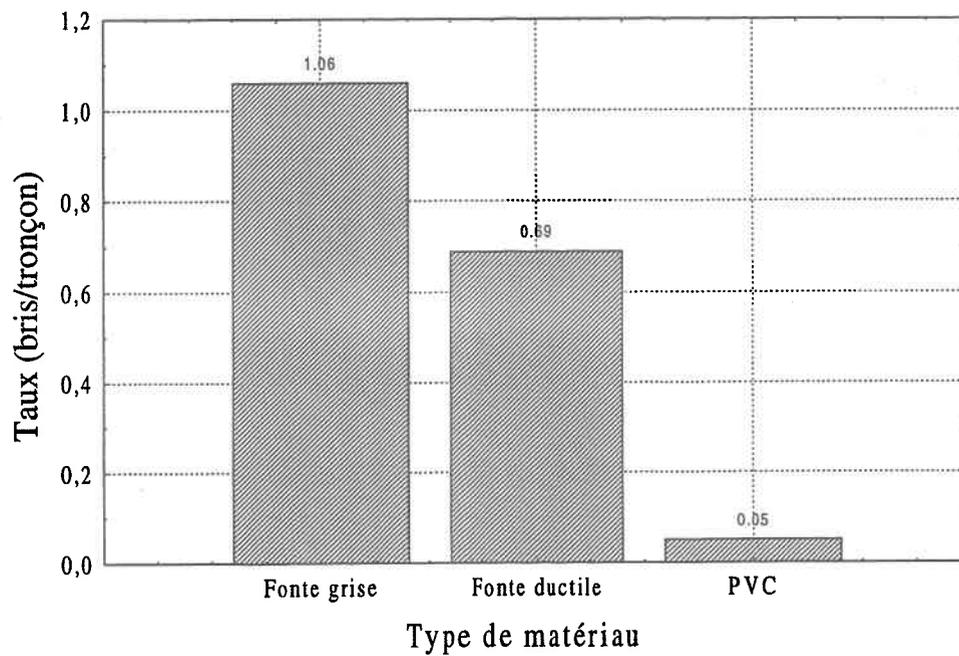
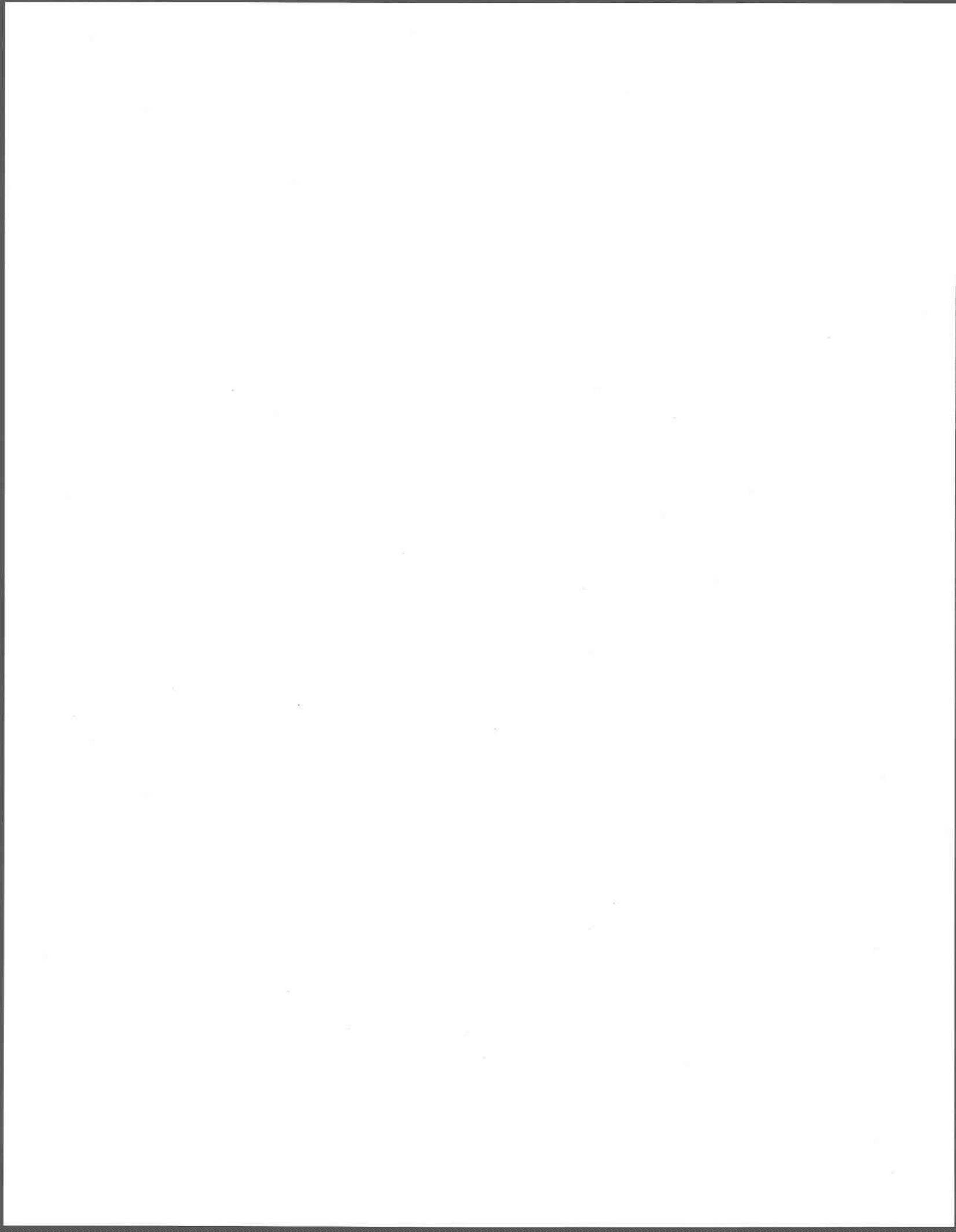


Figure B.11 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité A



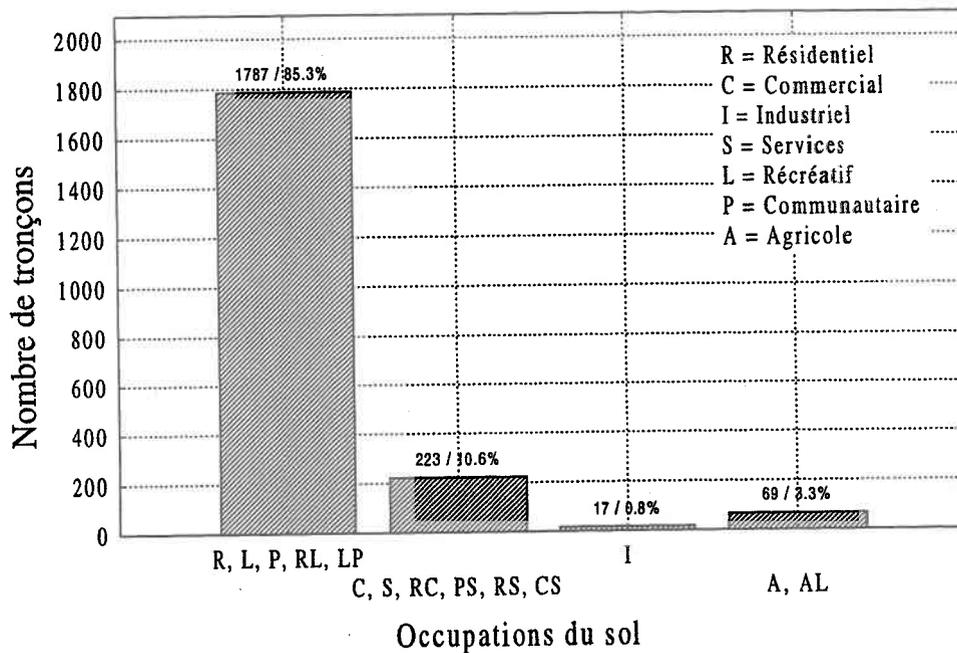


Figure B.12 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité A

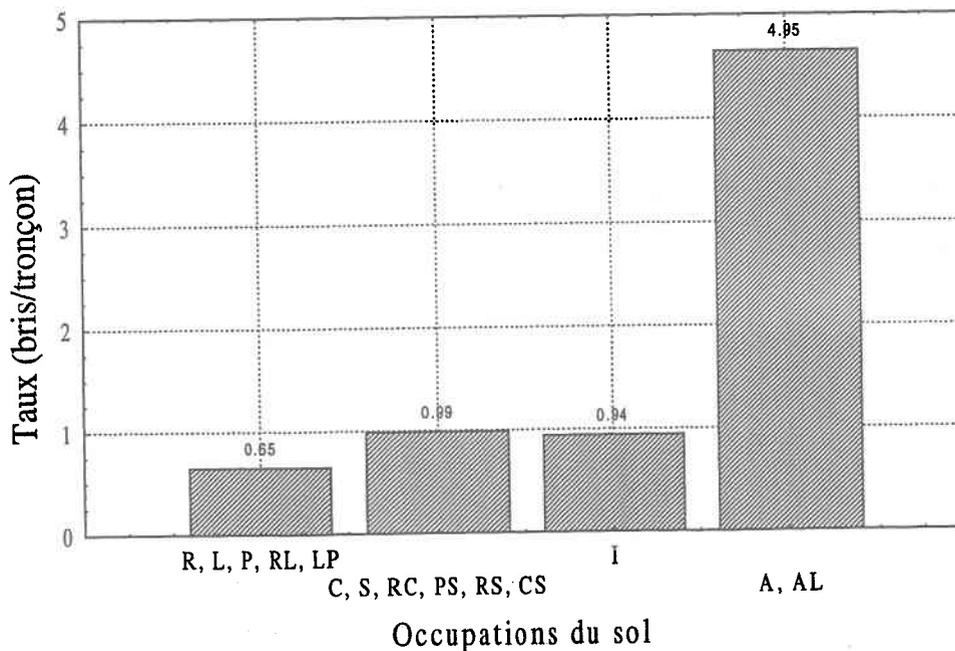
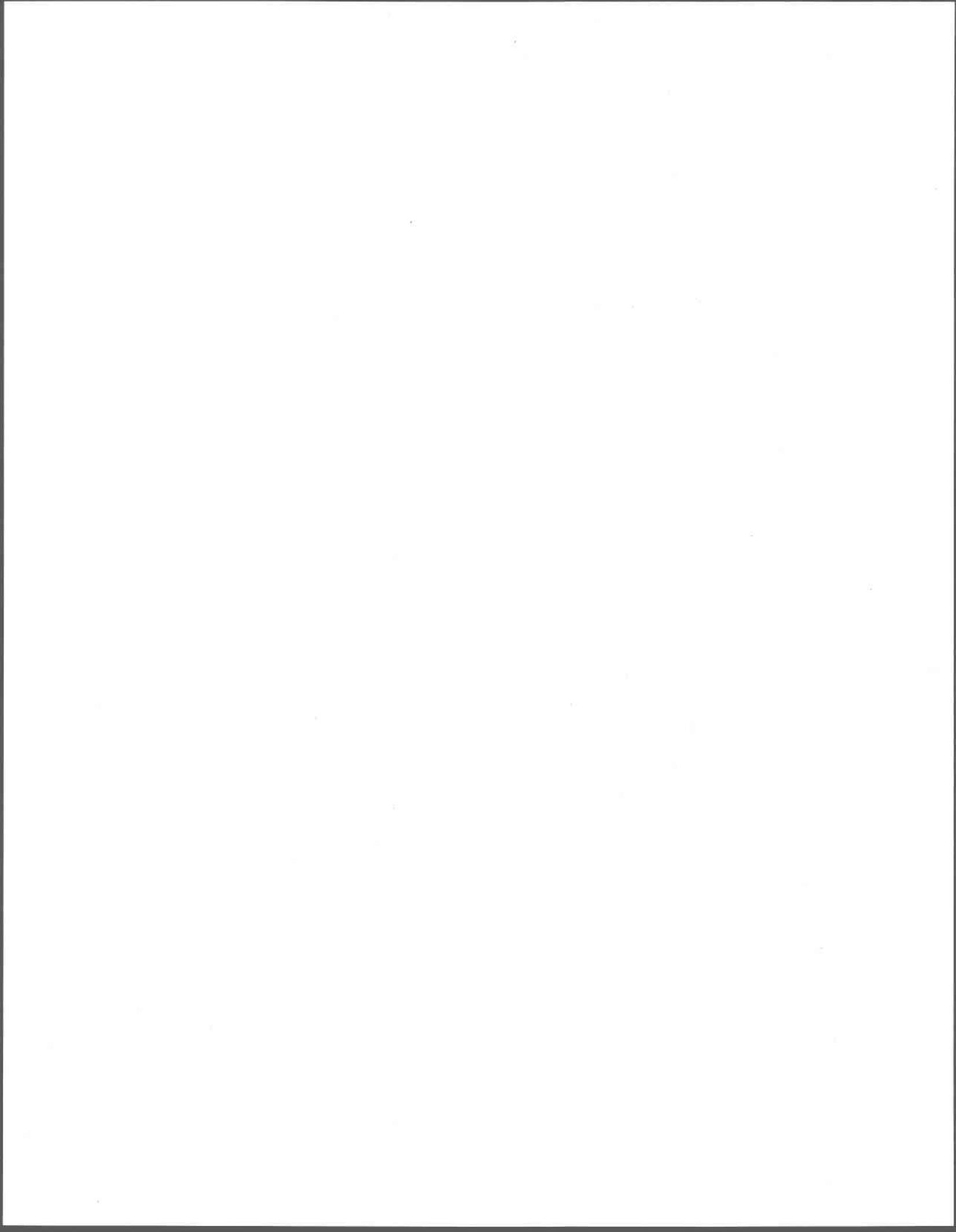


Figure B.13 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité A



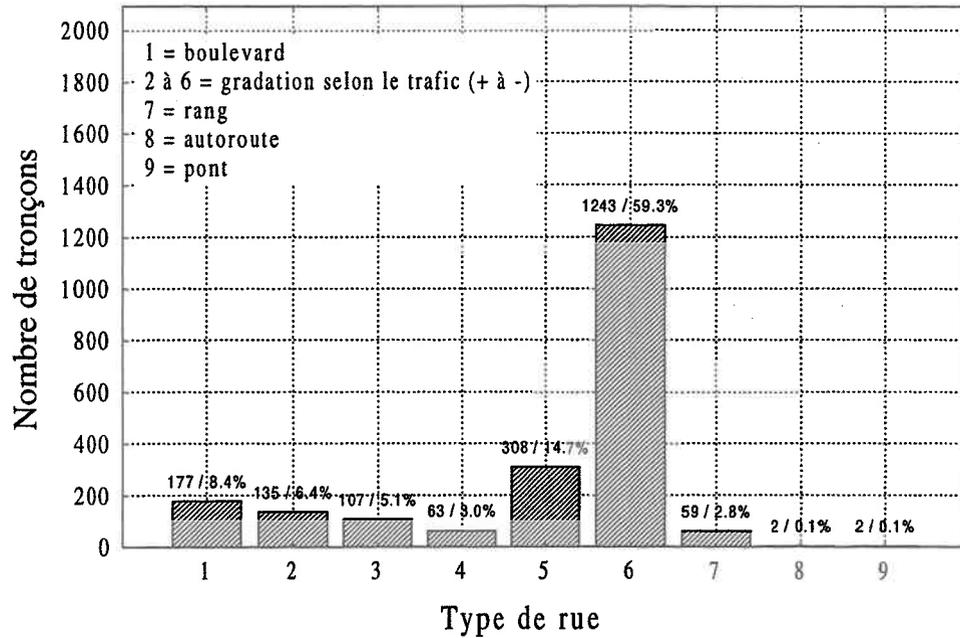


Figure B.14 Nombre et pourcentage de tronçons par type de rue pour la municipalité A

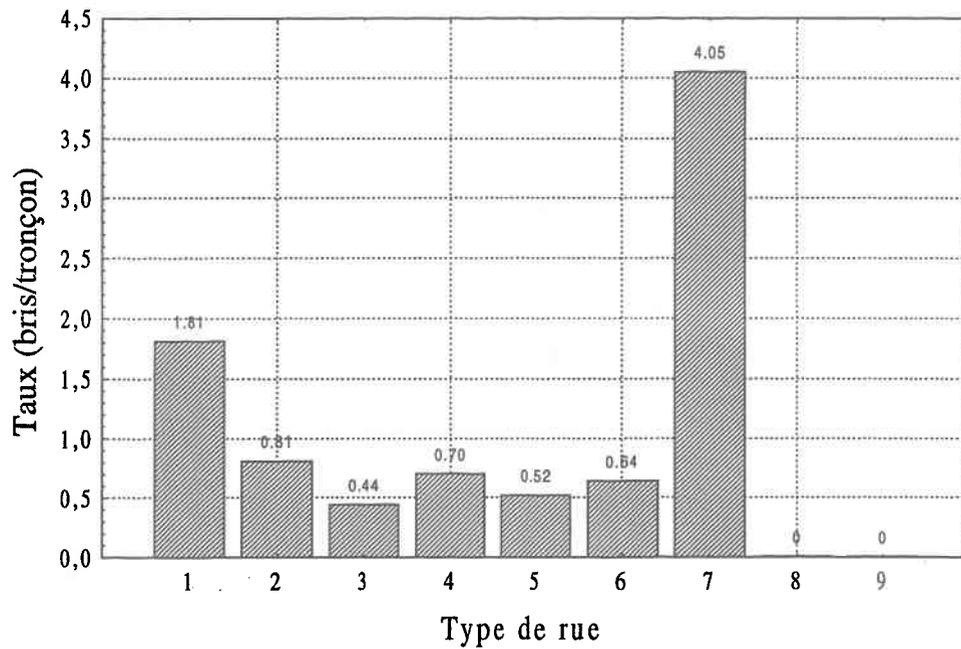
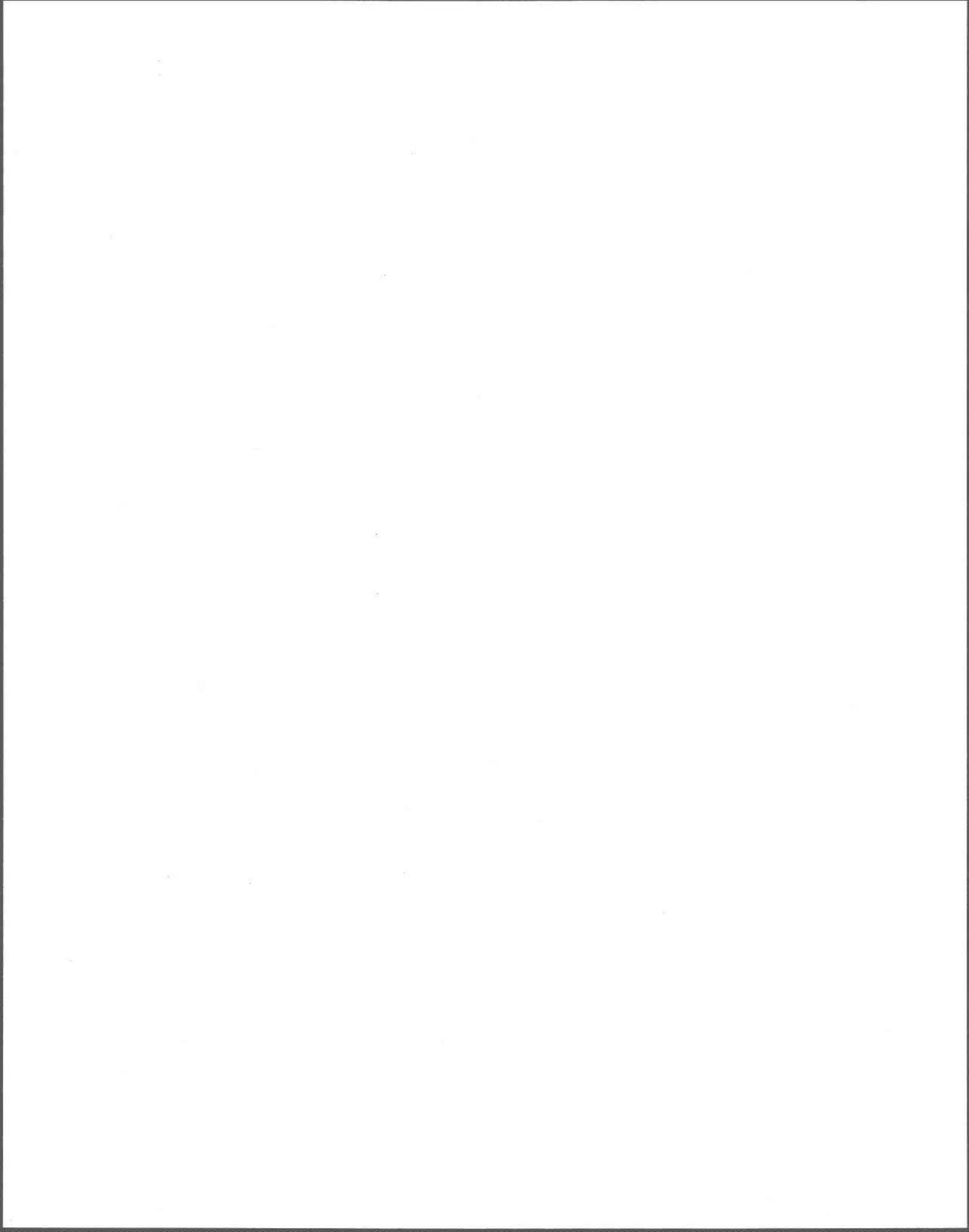


Figure B.15 Taux de bris par type de rue pour la municipalité A



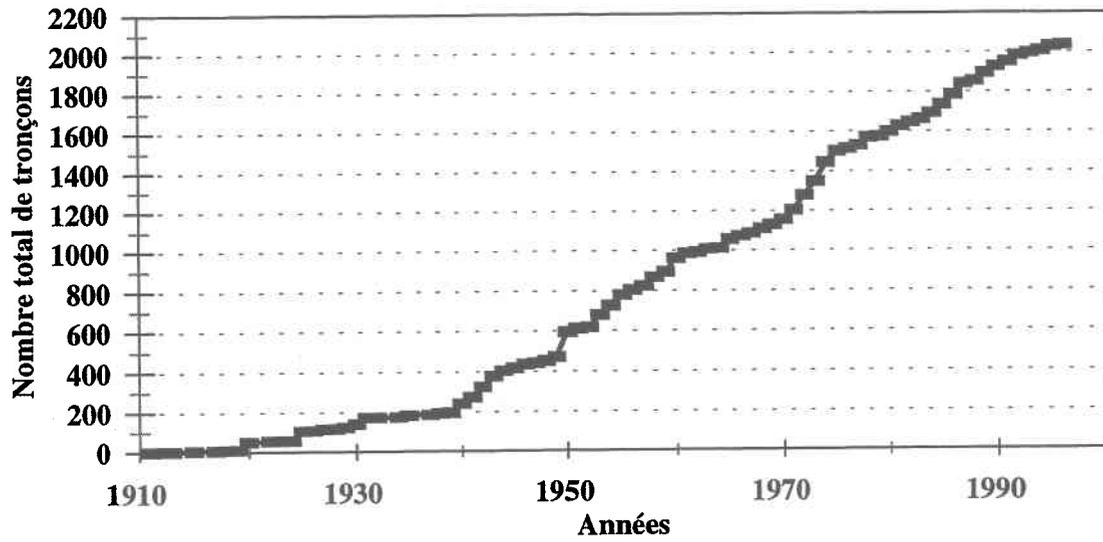


Figure B.16 Croissance de la municipalité B en terme de tronçons

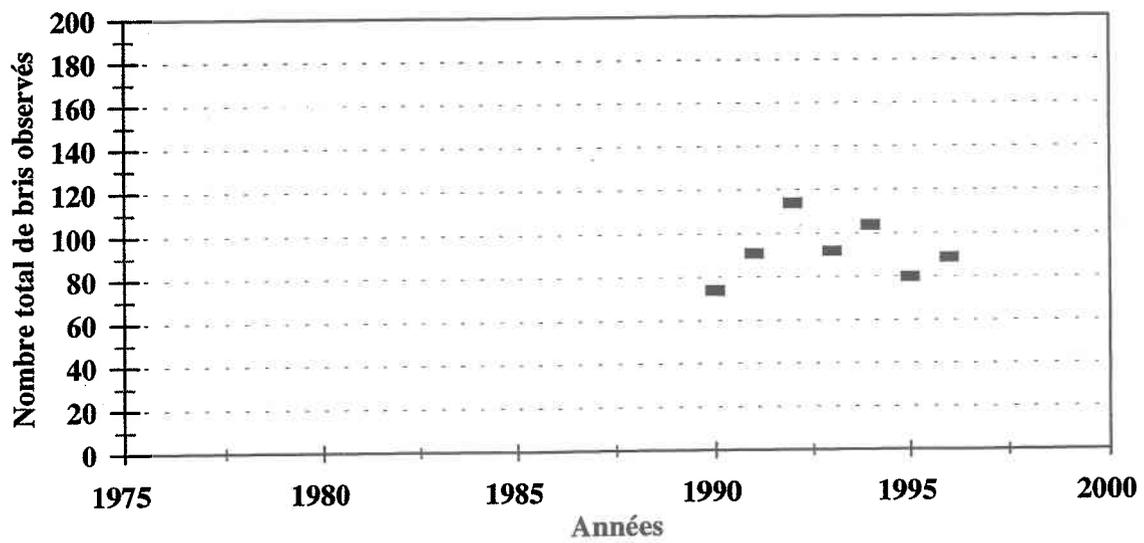
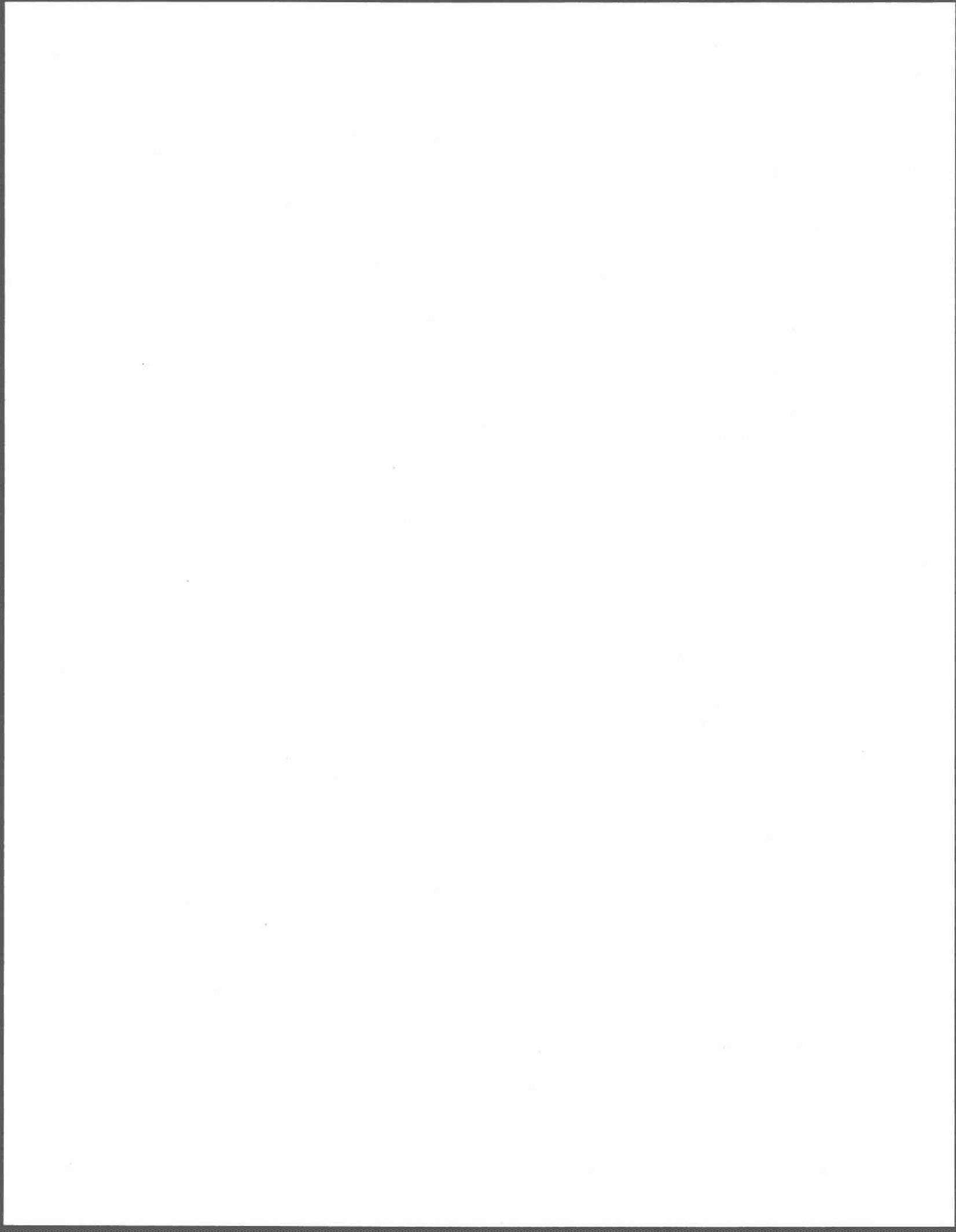


Figure B.17 Historique de bris pour la municipalité B



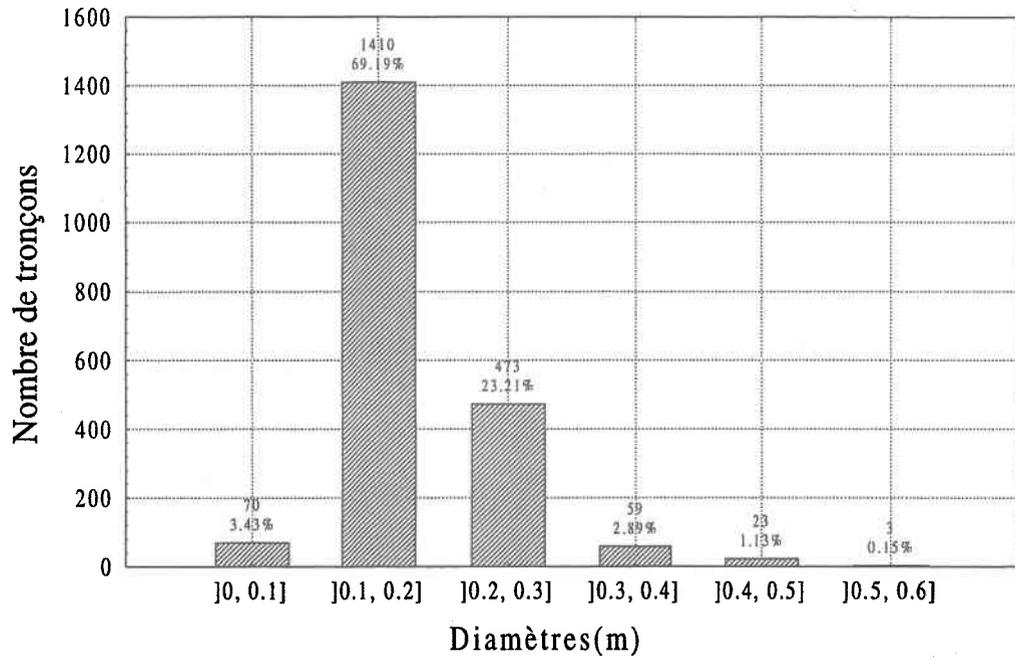


Figure B.18 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité B

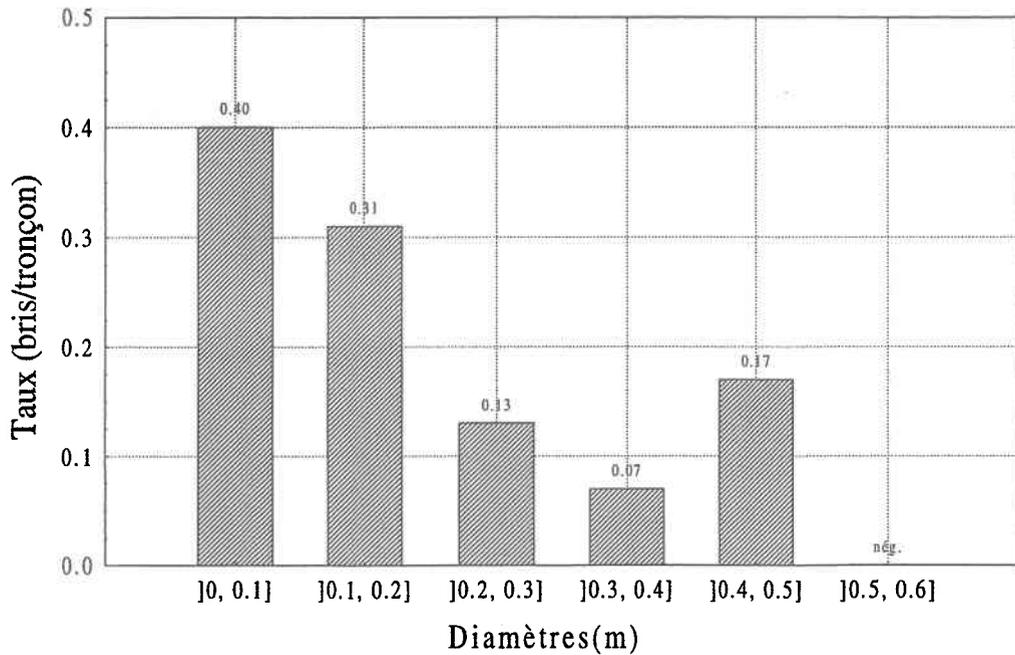
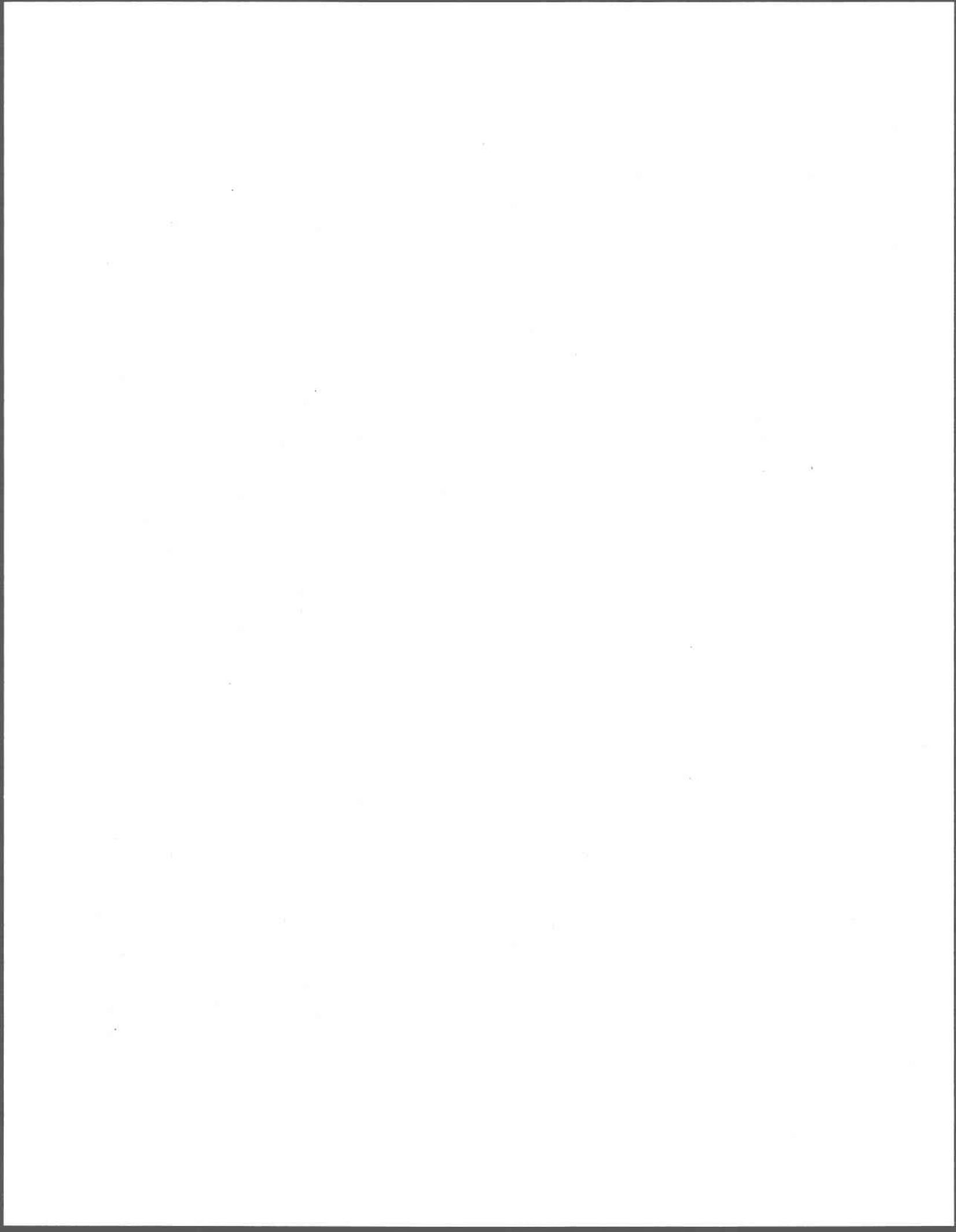


Figure B.19 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité B



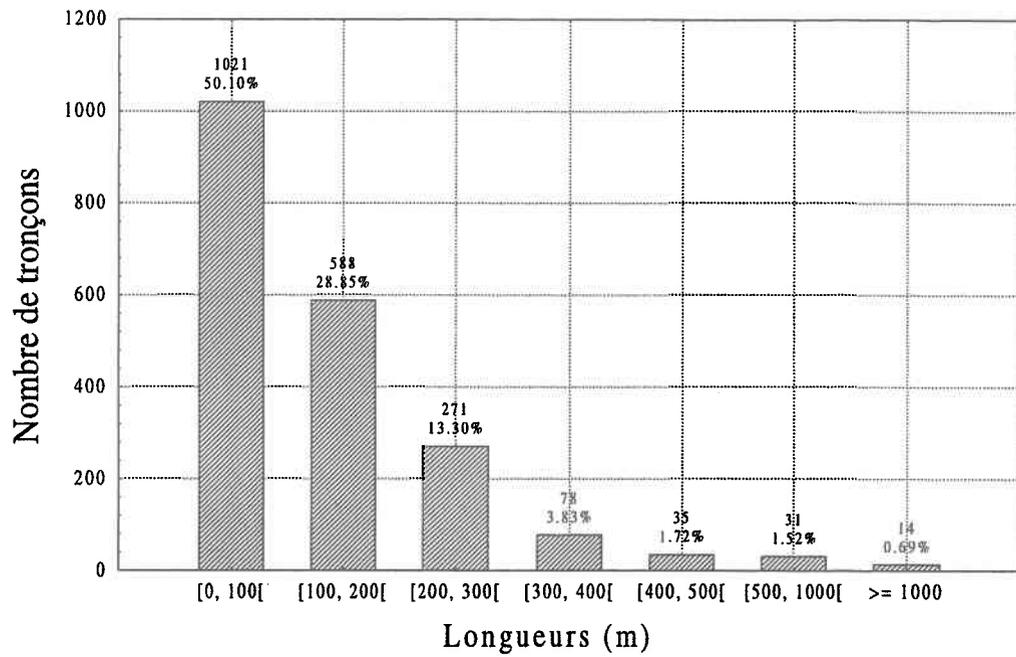


Figure B.20 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité B

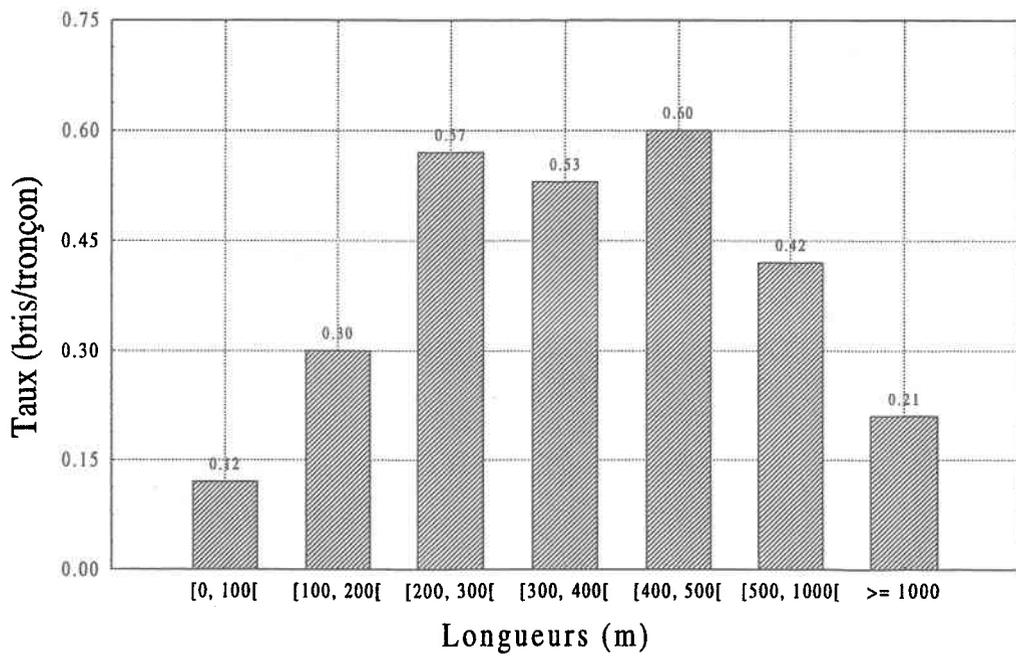
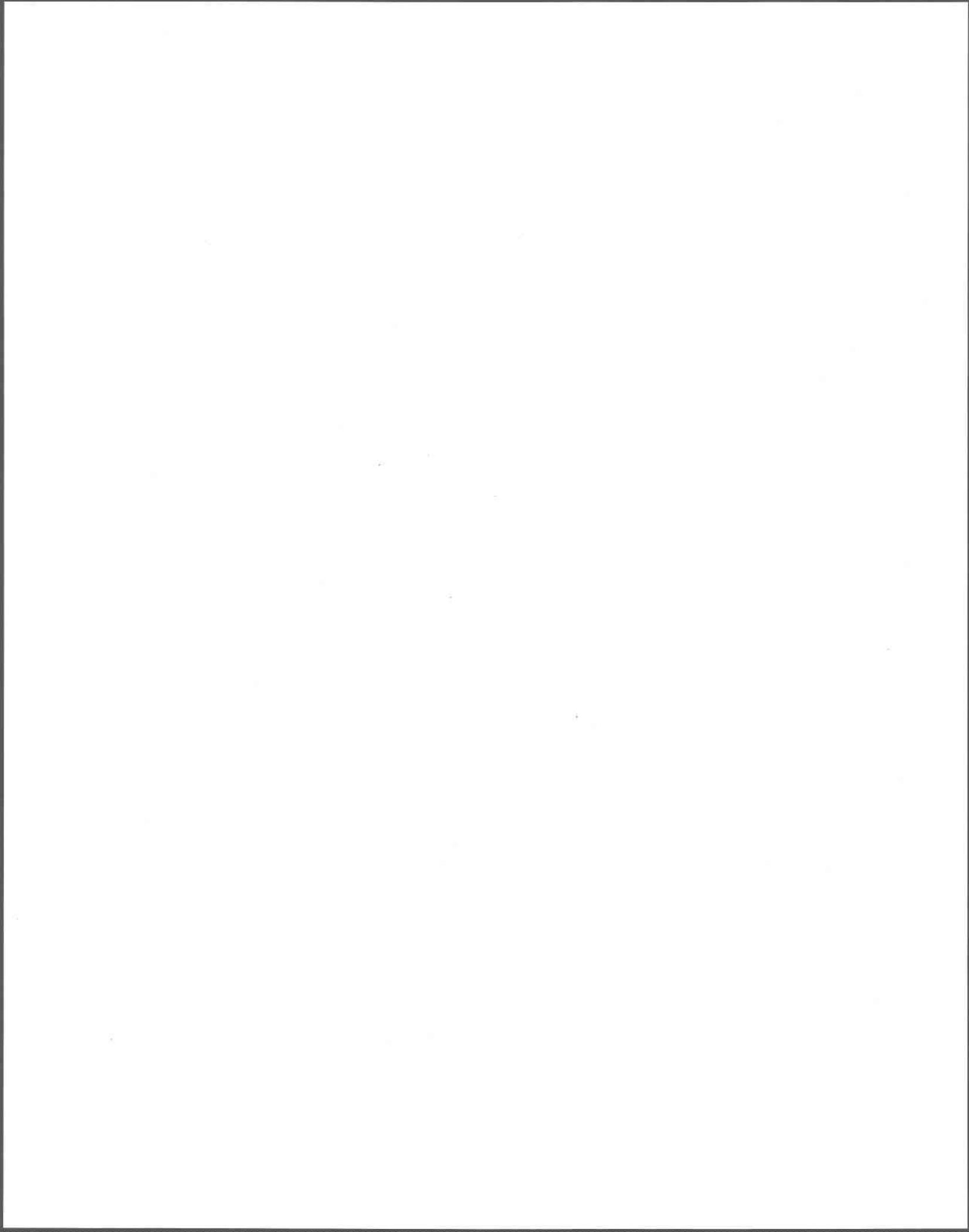


Figure B.21 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité B



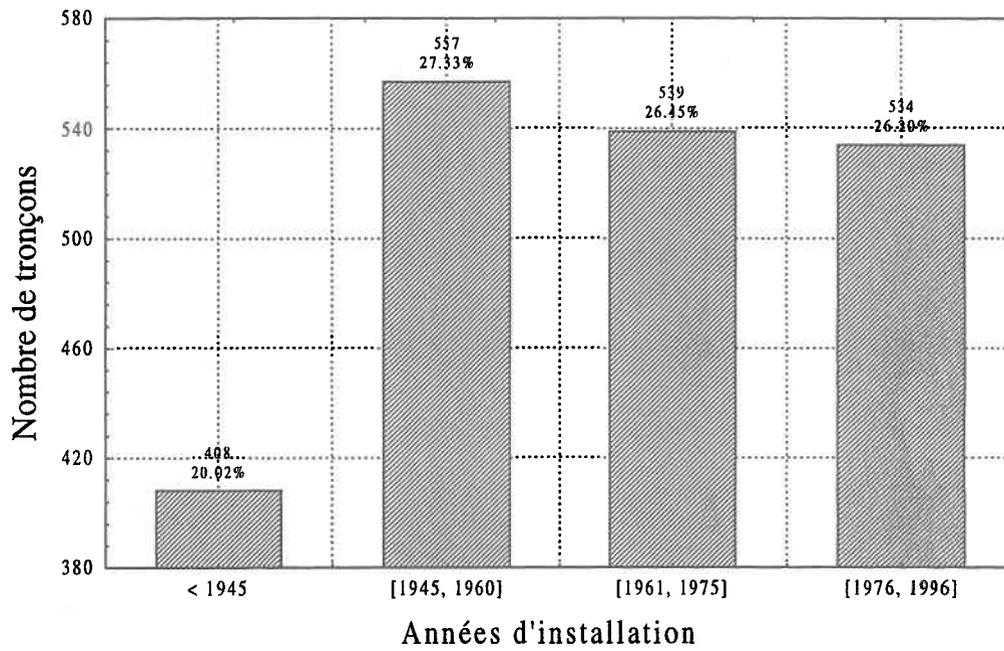


Figure B.22 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité B

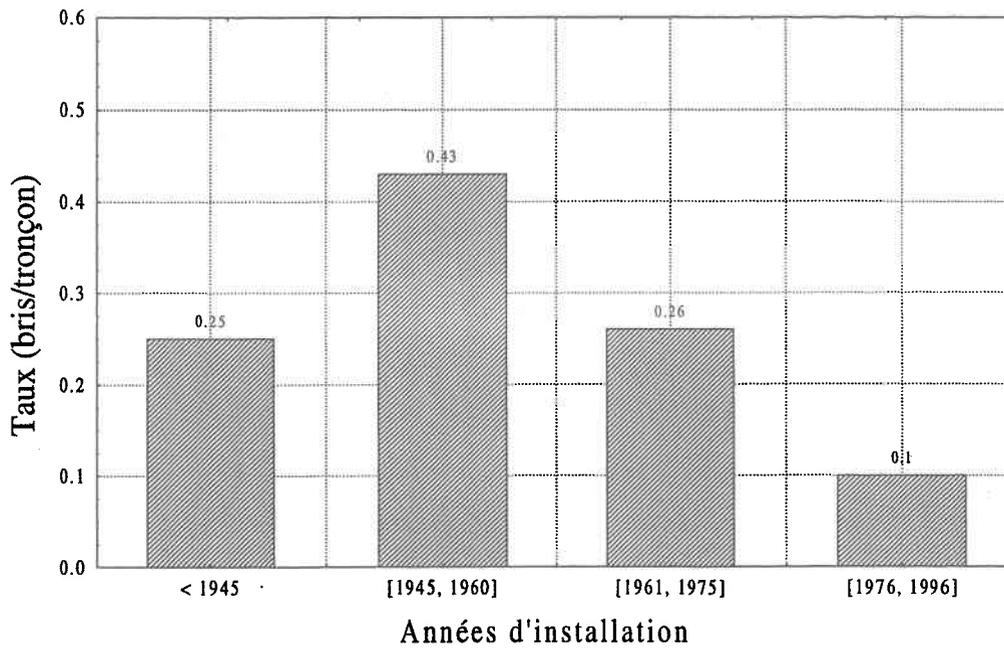
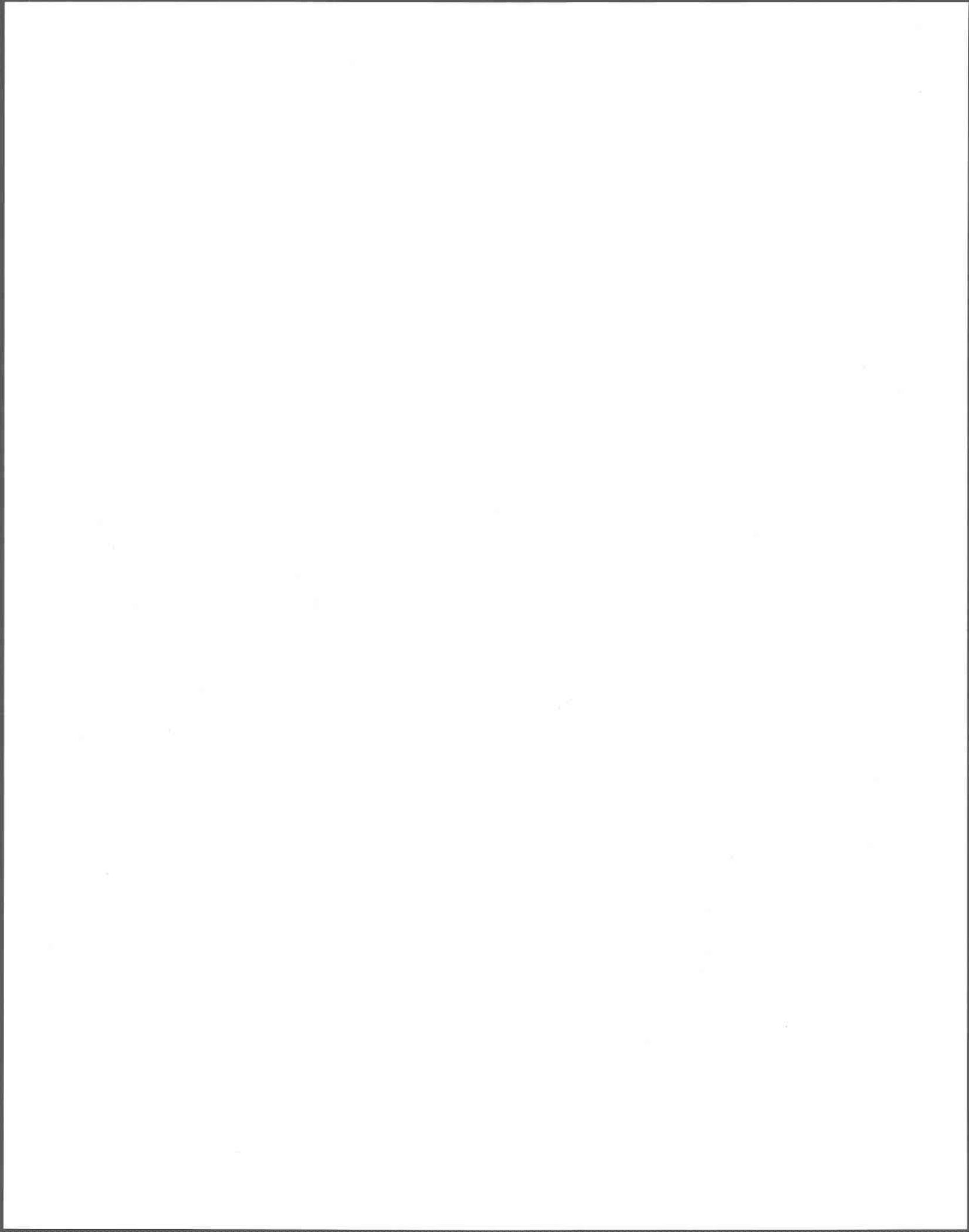


Figure B.23 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité B



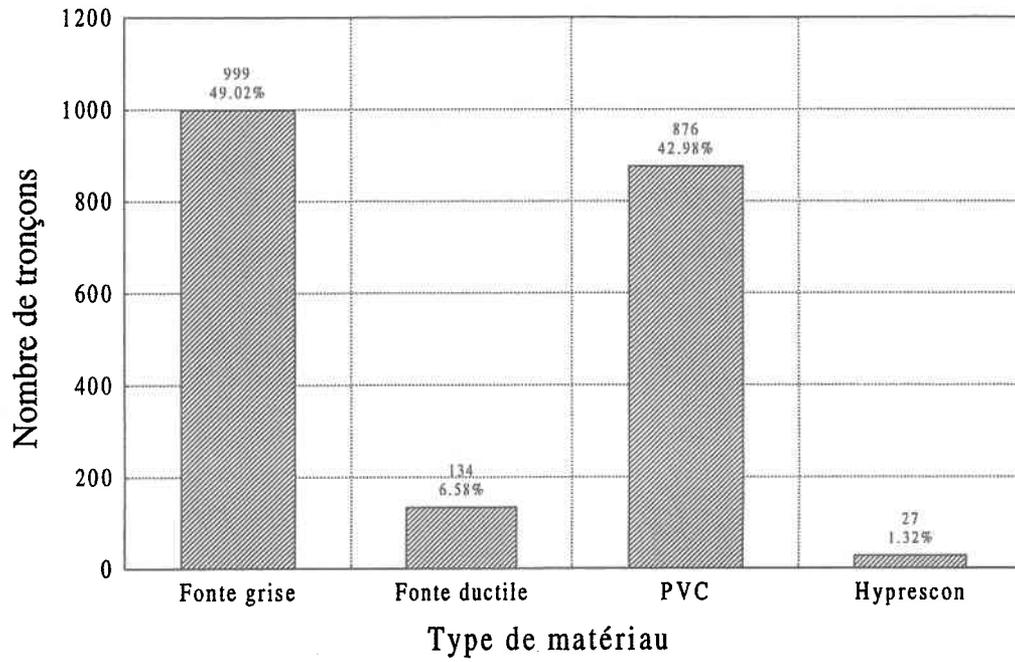


Figure B.24 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité B

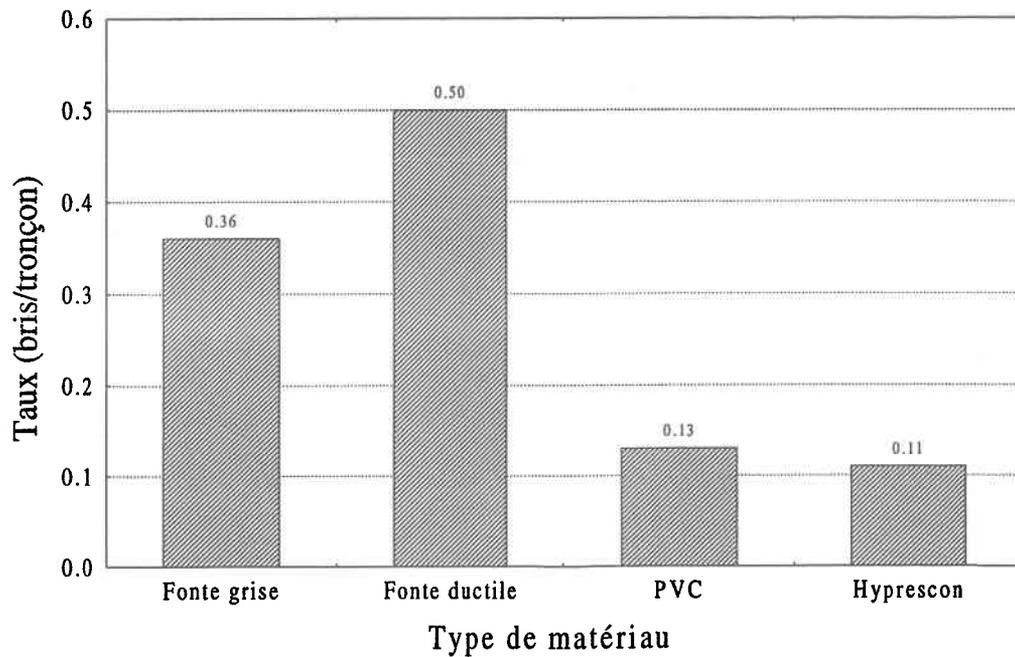


Figure B.25 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité B



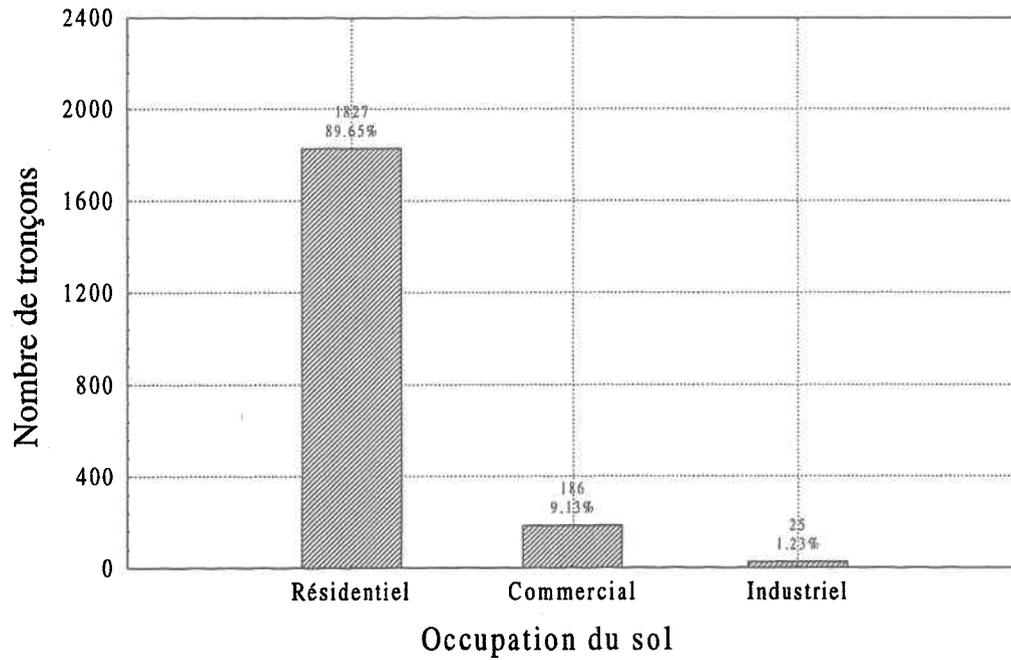


Figure B.26 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité B

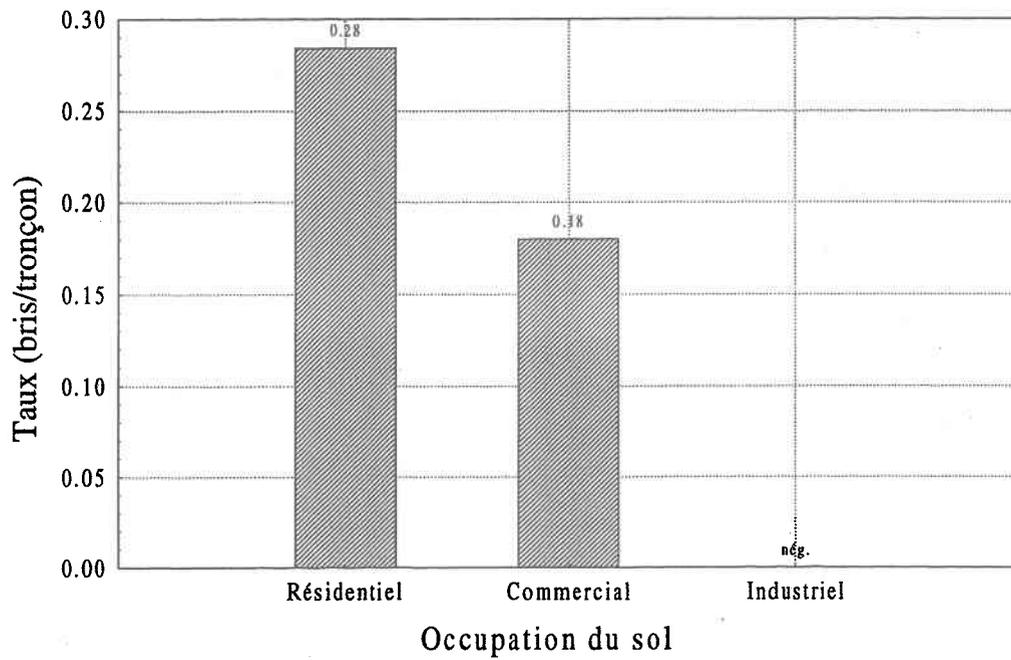
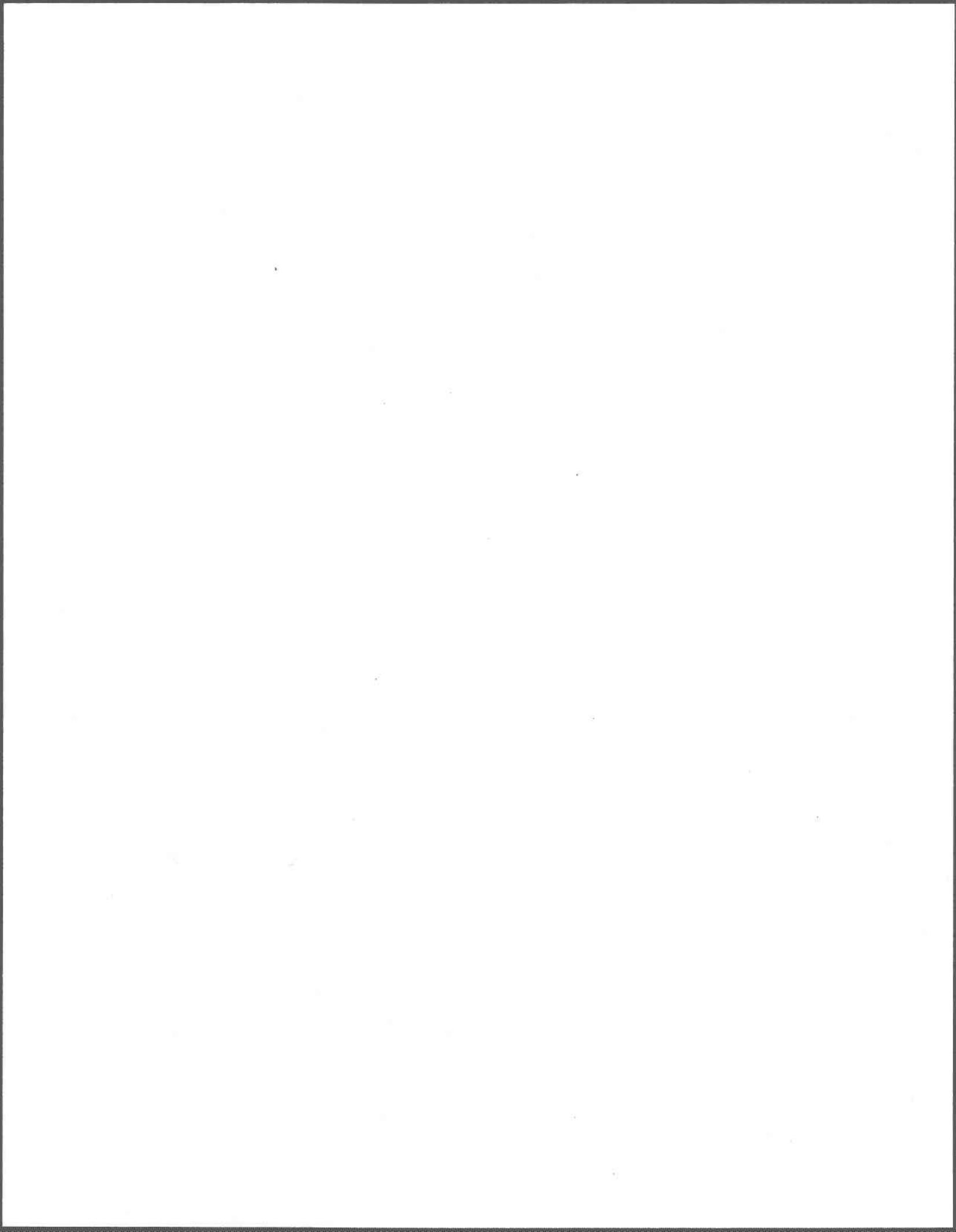


Figure B.27 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité B



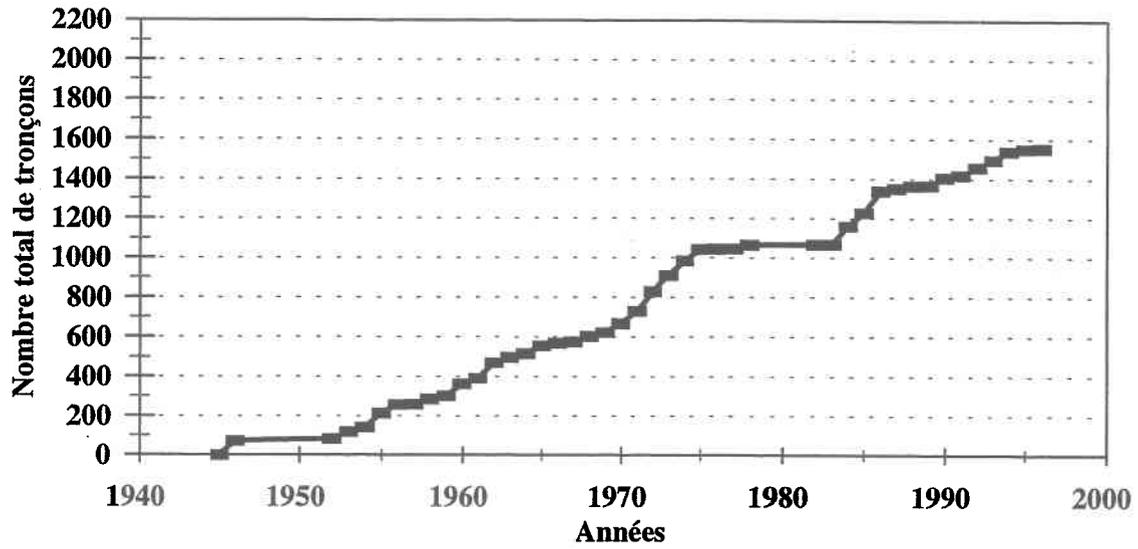


Figure B.28 Croissance de la municipalité C en terme de tronçons

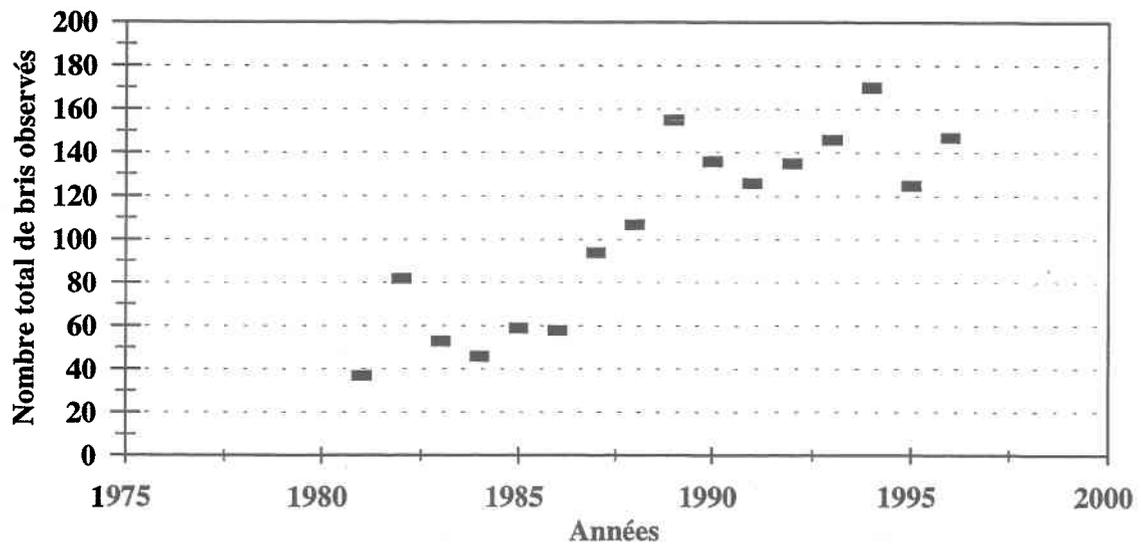
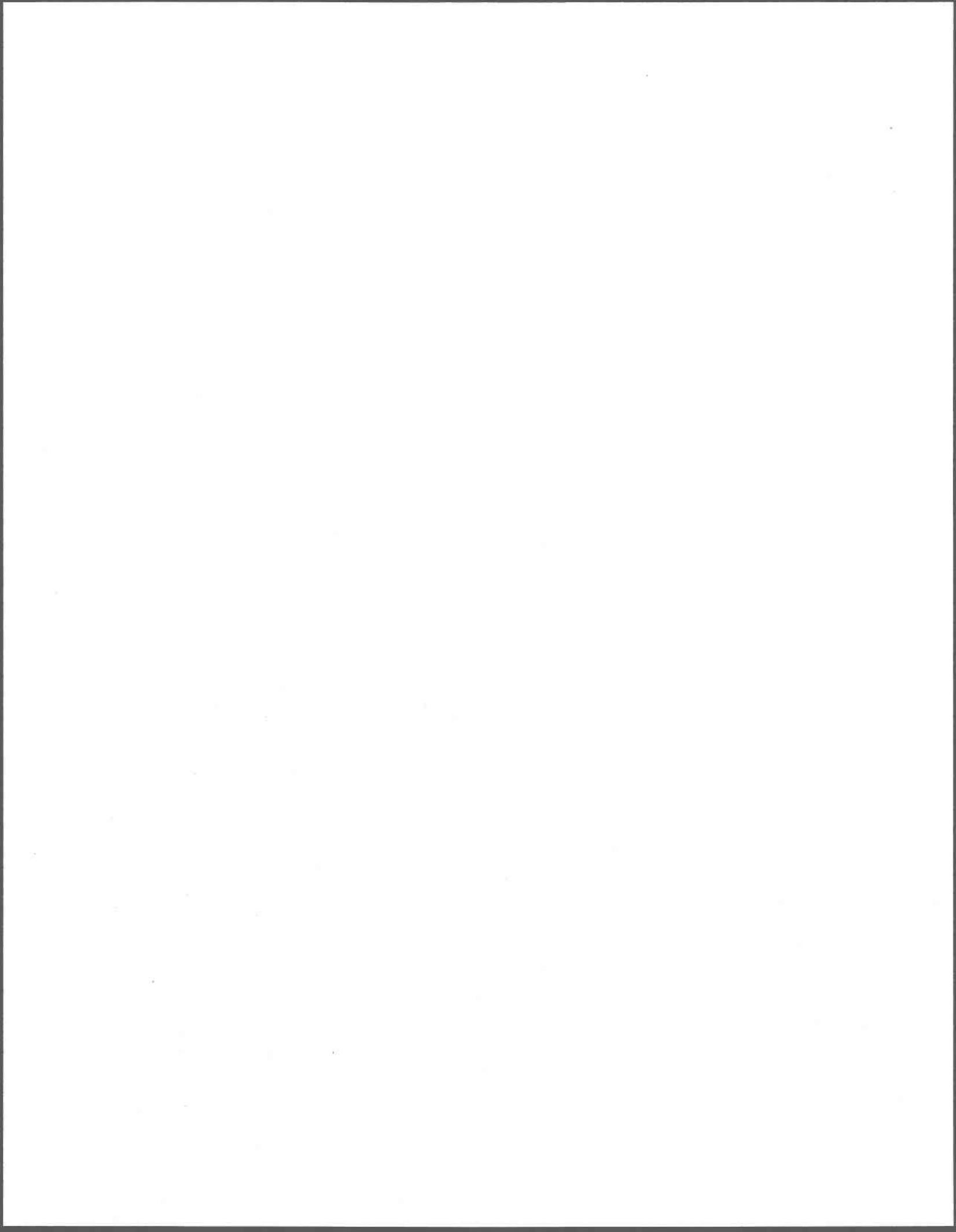


Figure B.29 Historique de bris pour la municipalité C



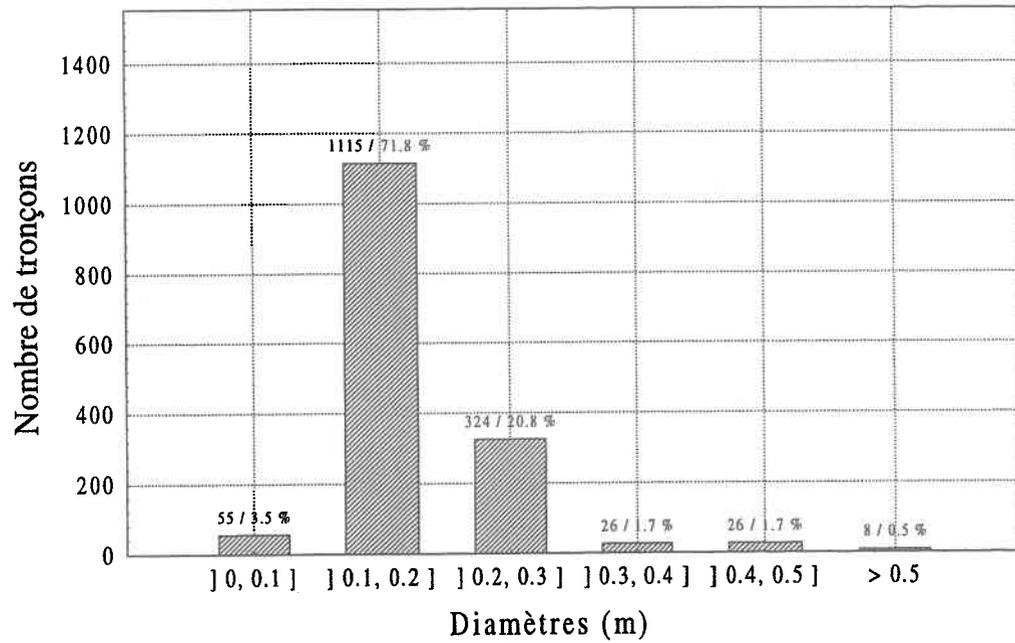


Figure B.30 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité C

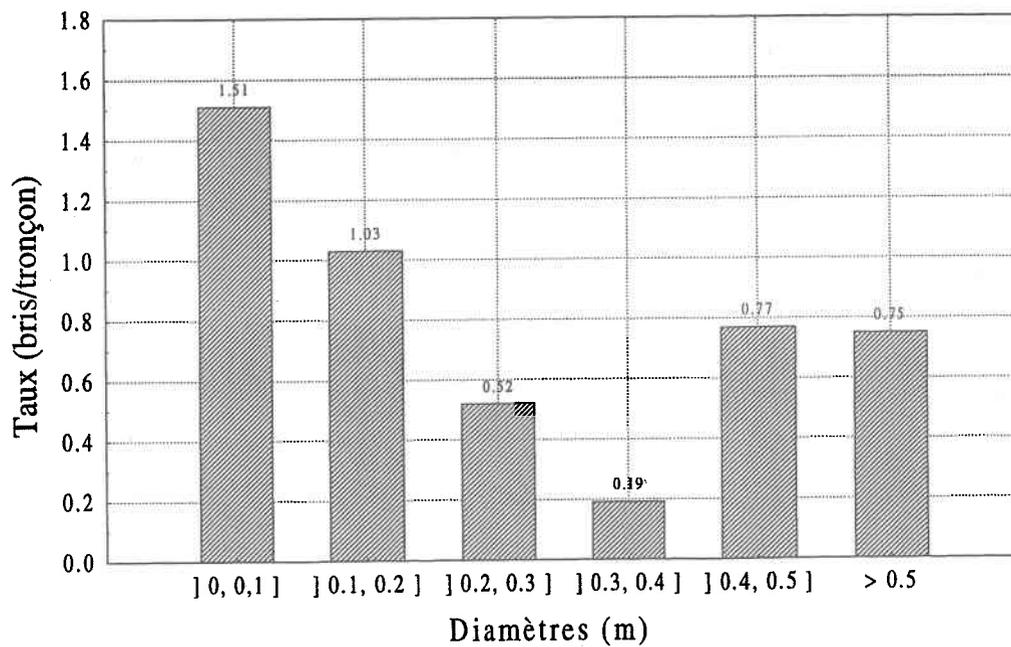
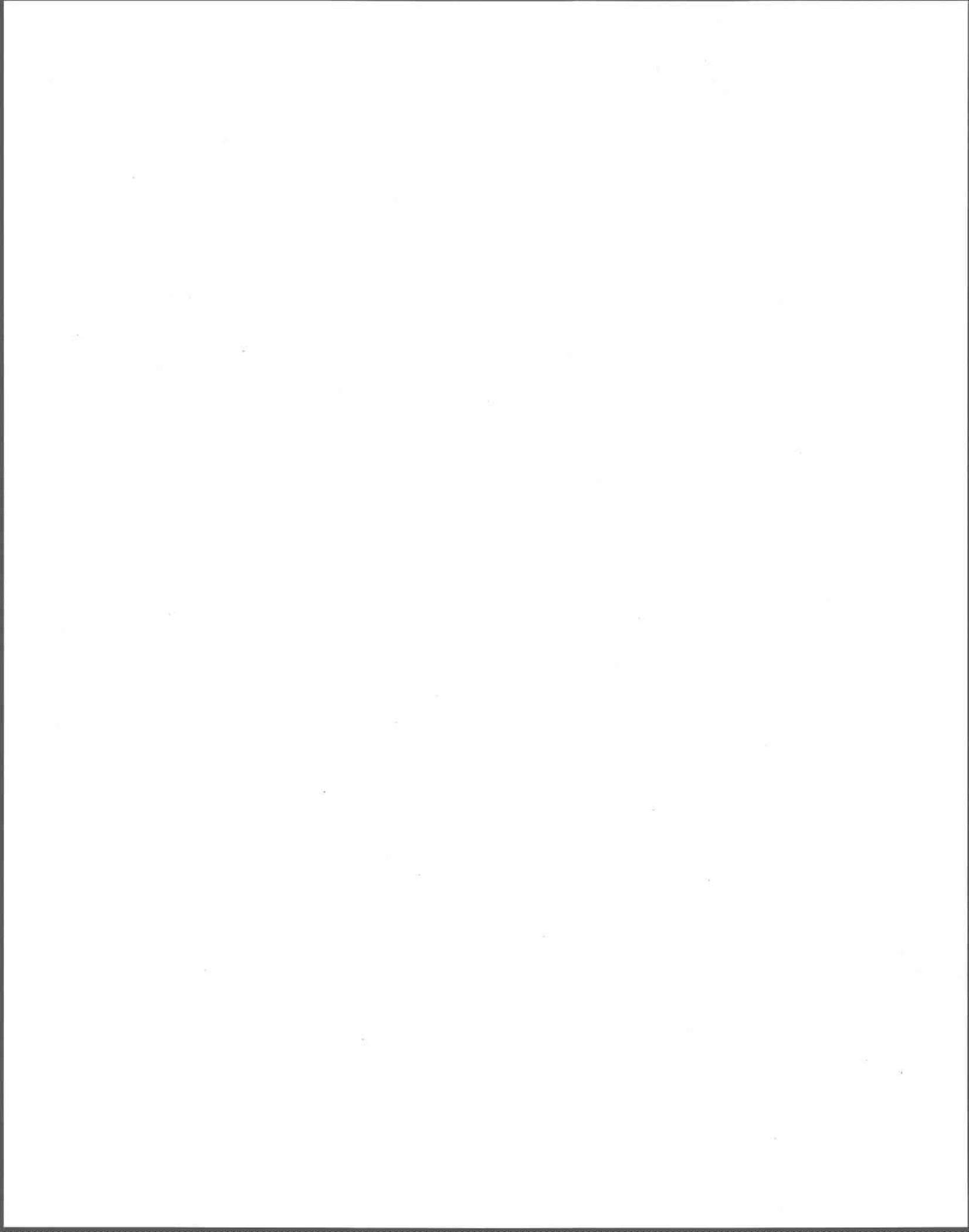


Figure B.31 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité C



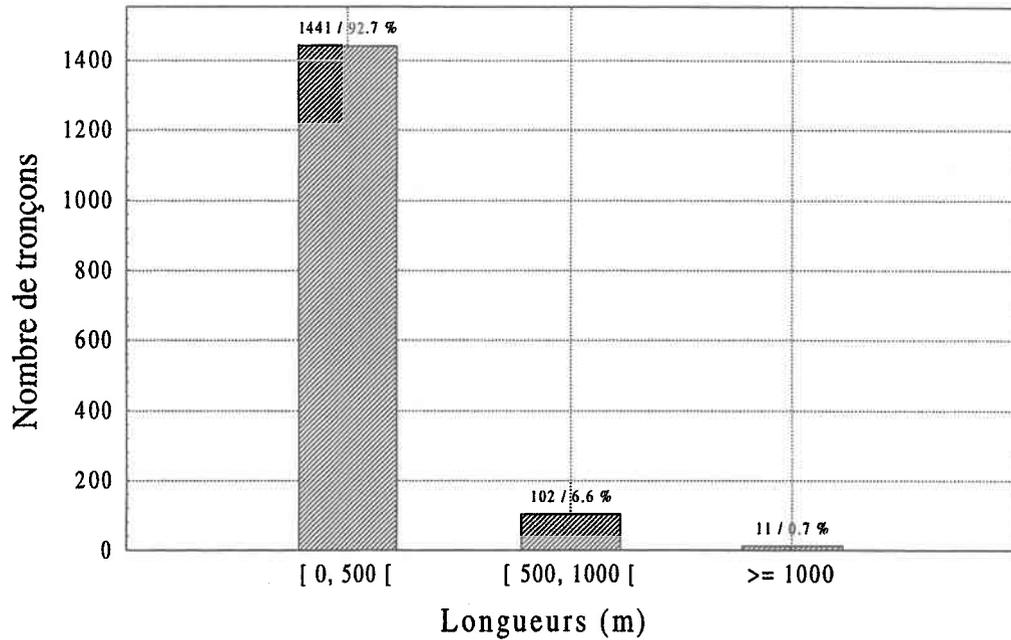


Figure B.32 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité C

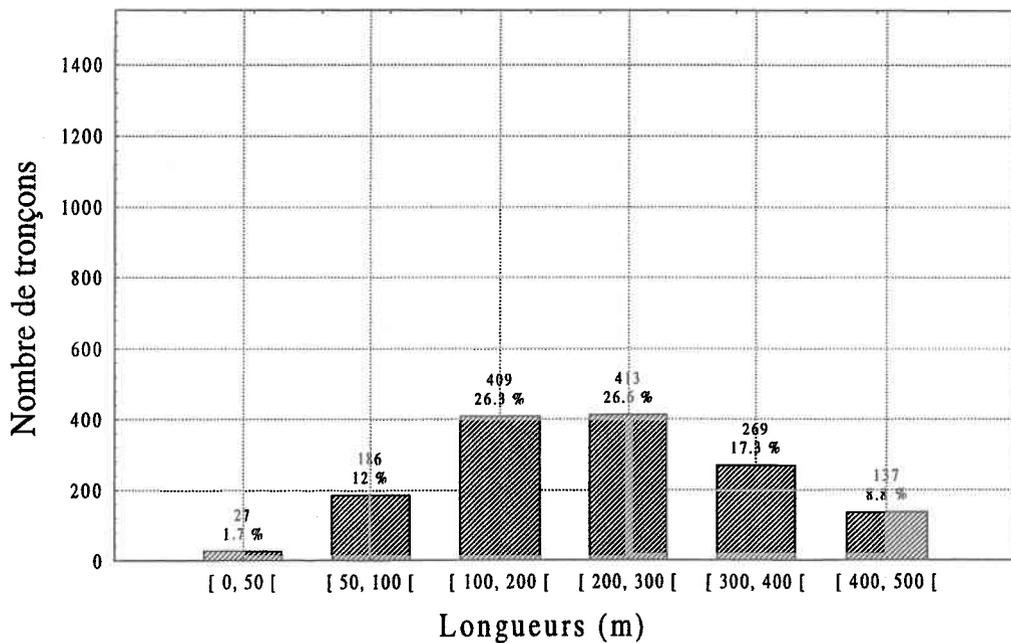
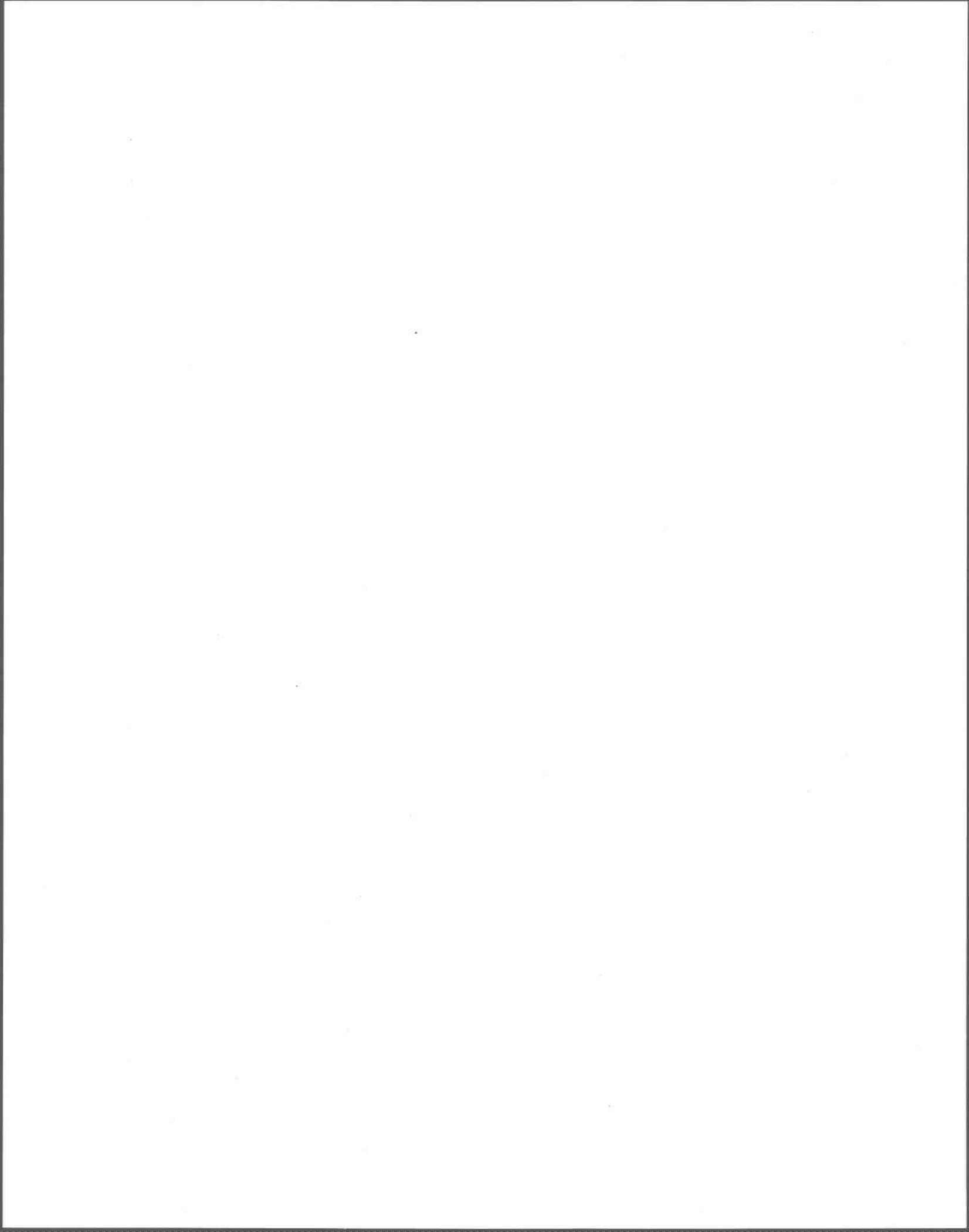


Figure B.33 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour les tronçons de longueur inférieure à 500 m pour la municipalité C



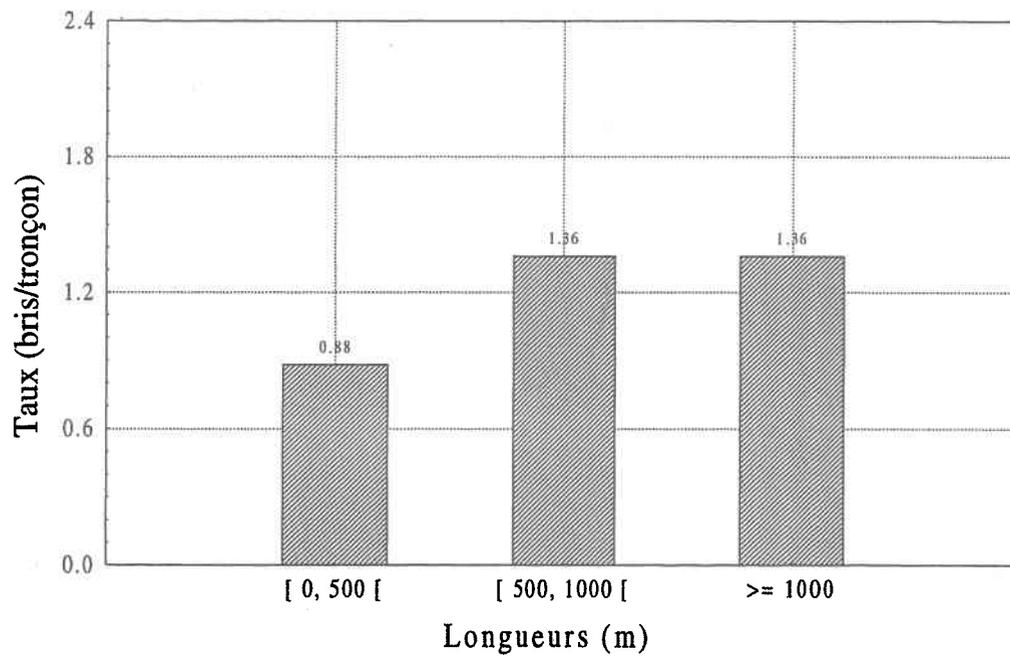
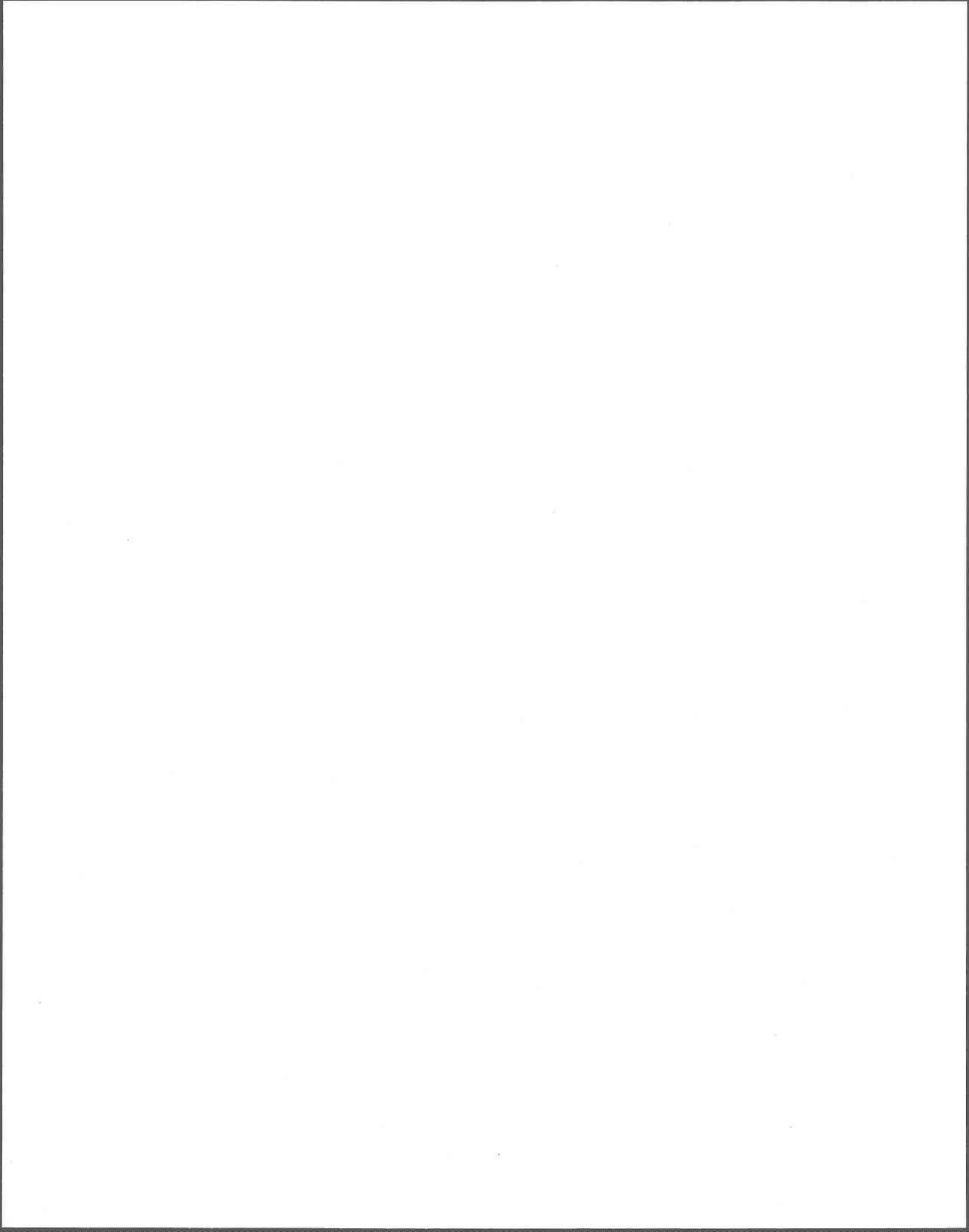


Figure B.34 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité C



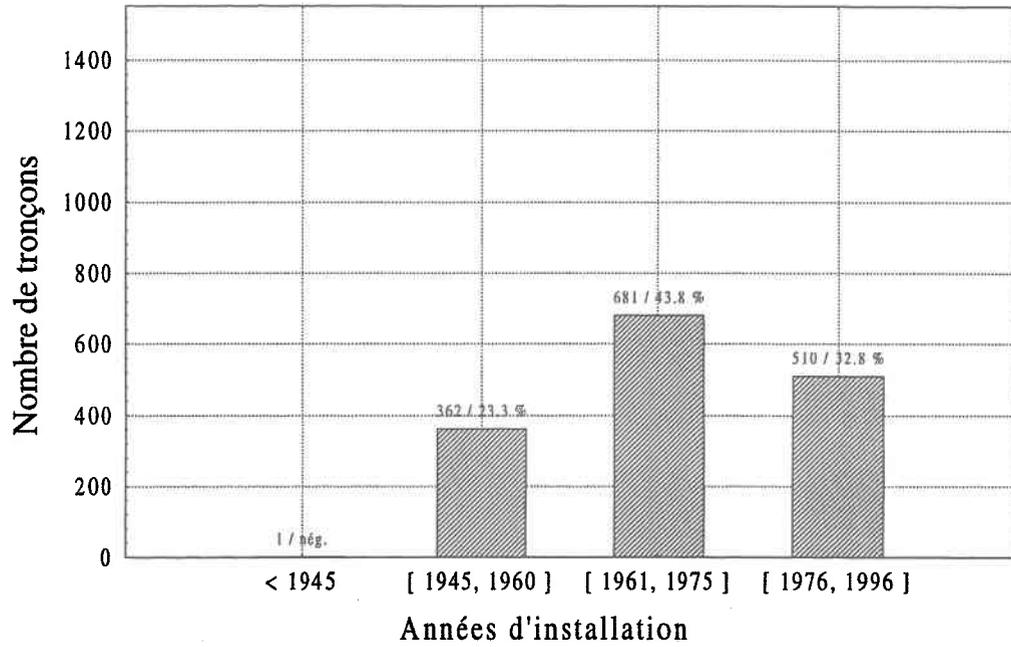


Figure B.35 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité C

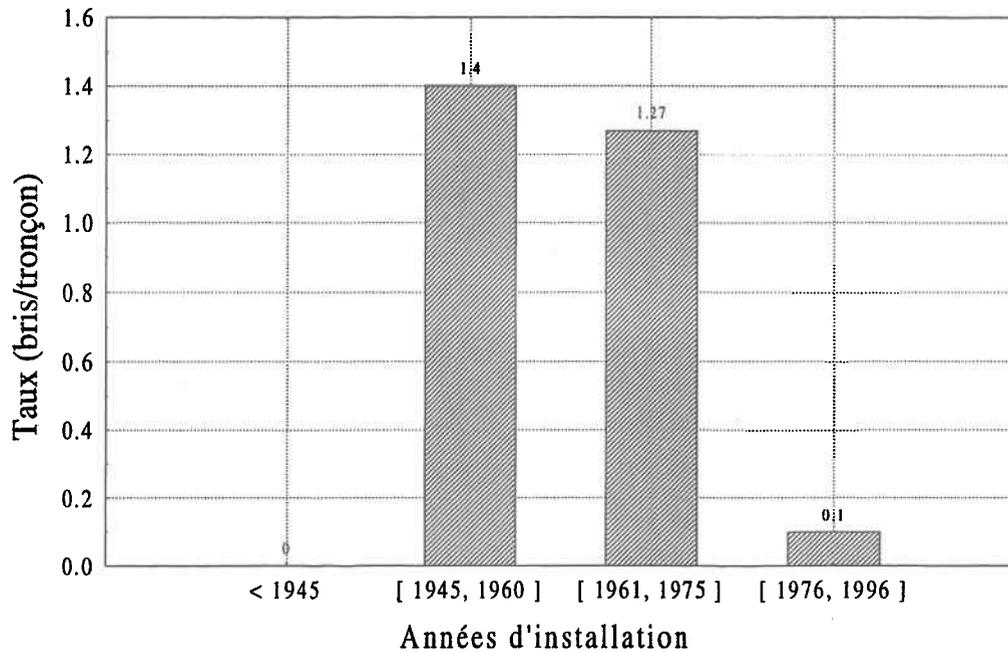
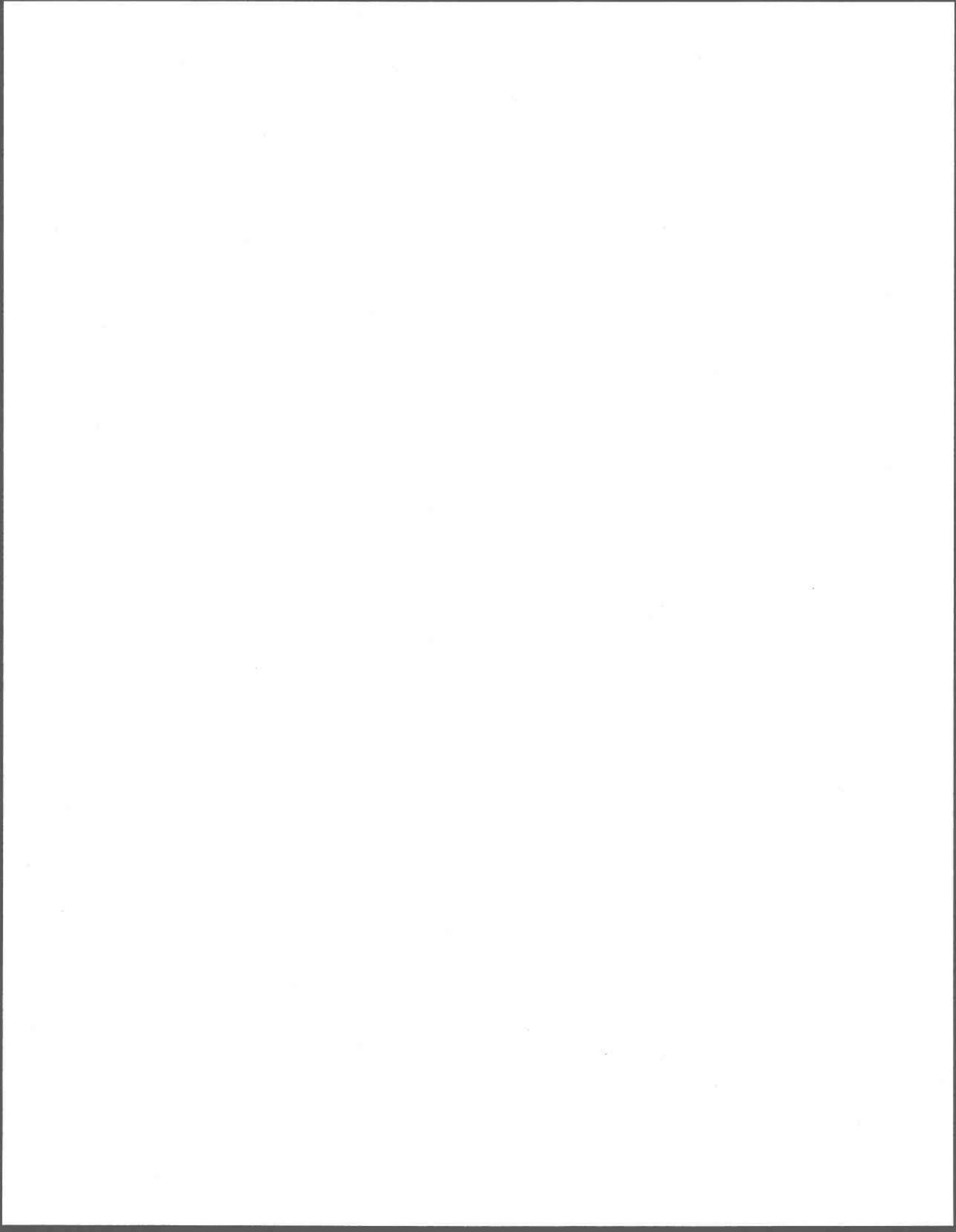


Figure B.36 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité C



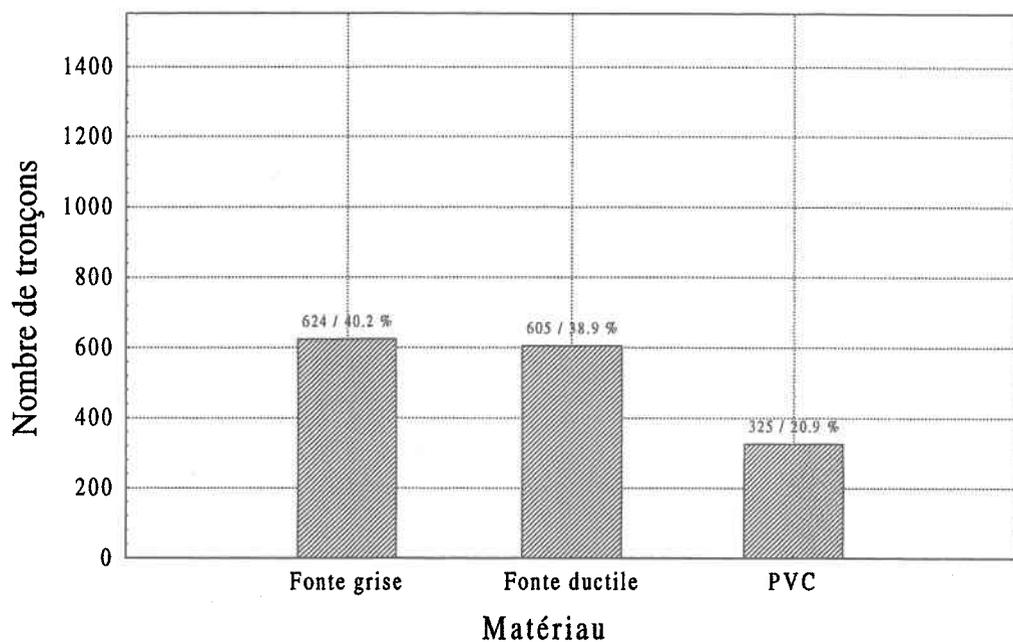


Figure B.37 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité C

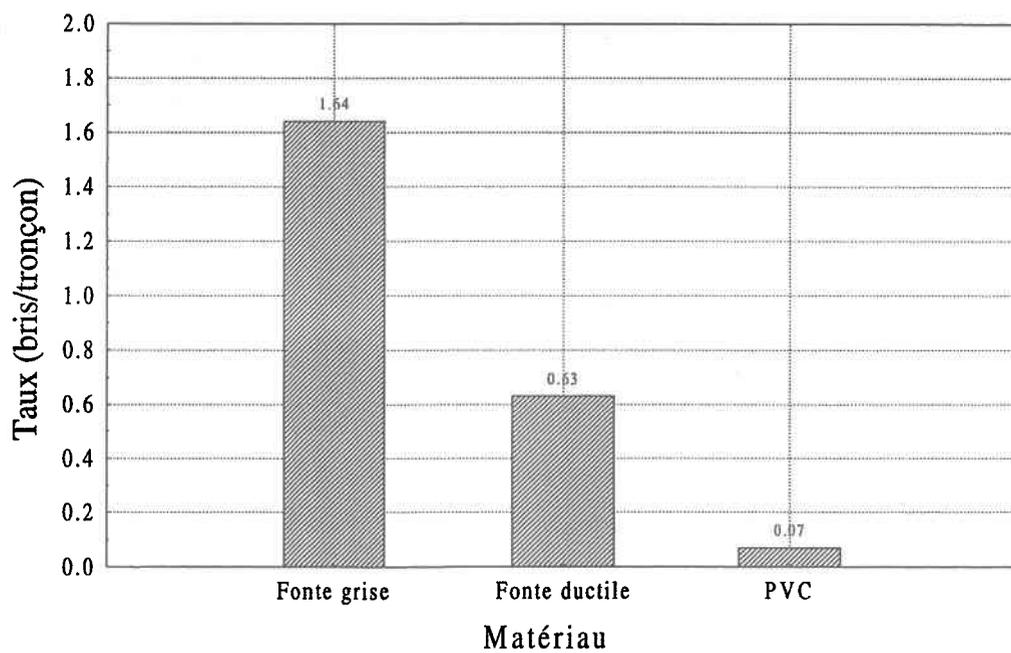
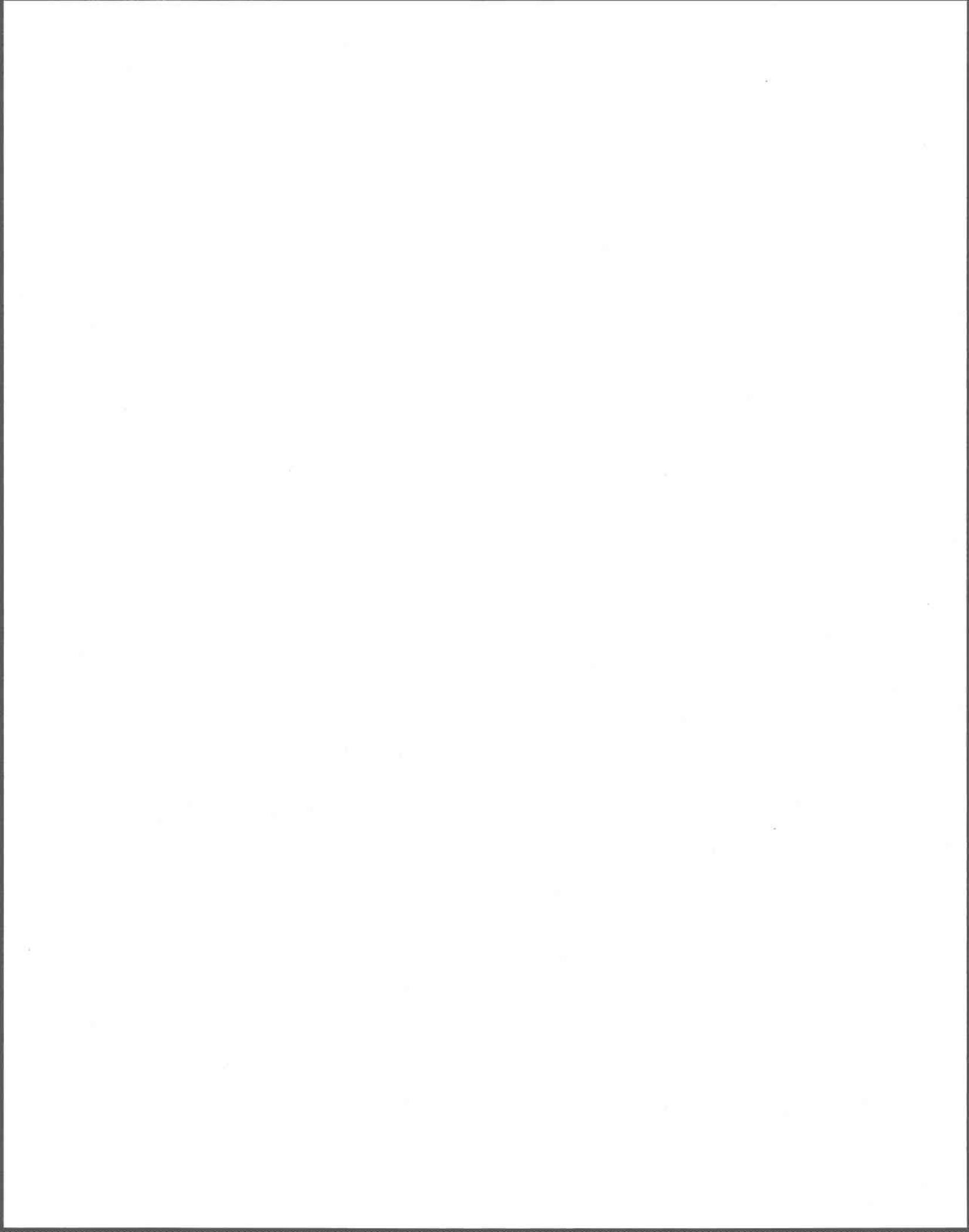


Figure B.38 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité C



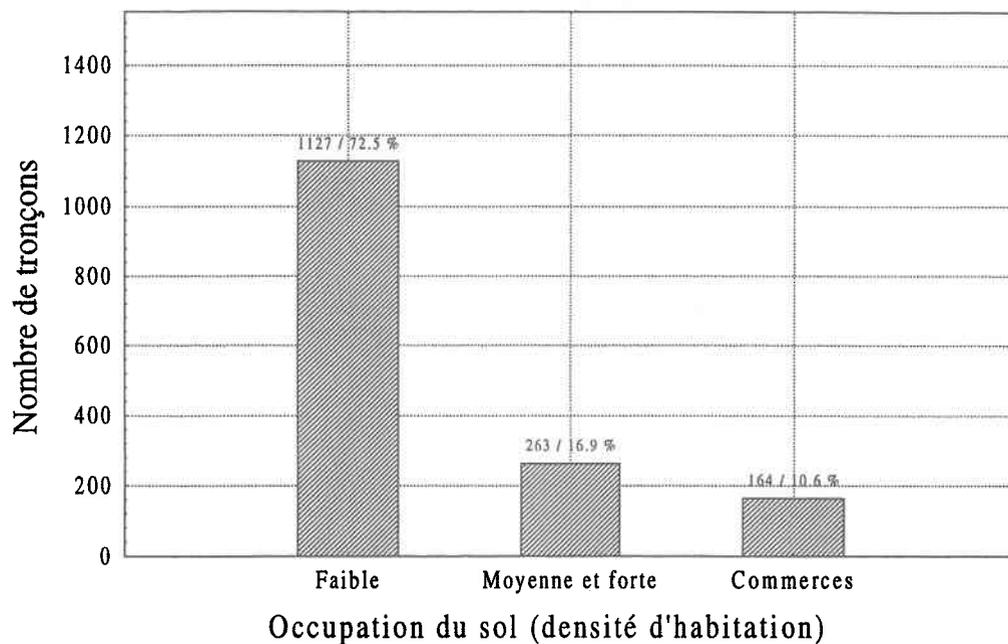


Figure B.39 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité C

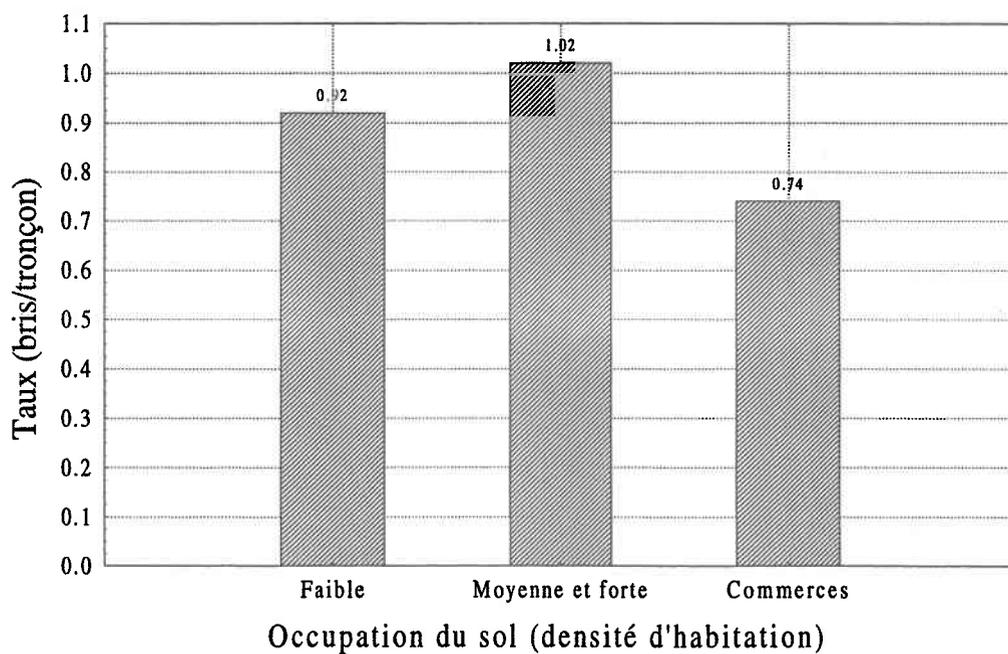
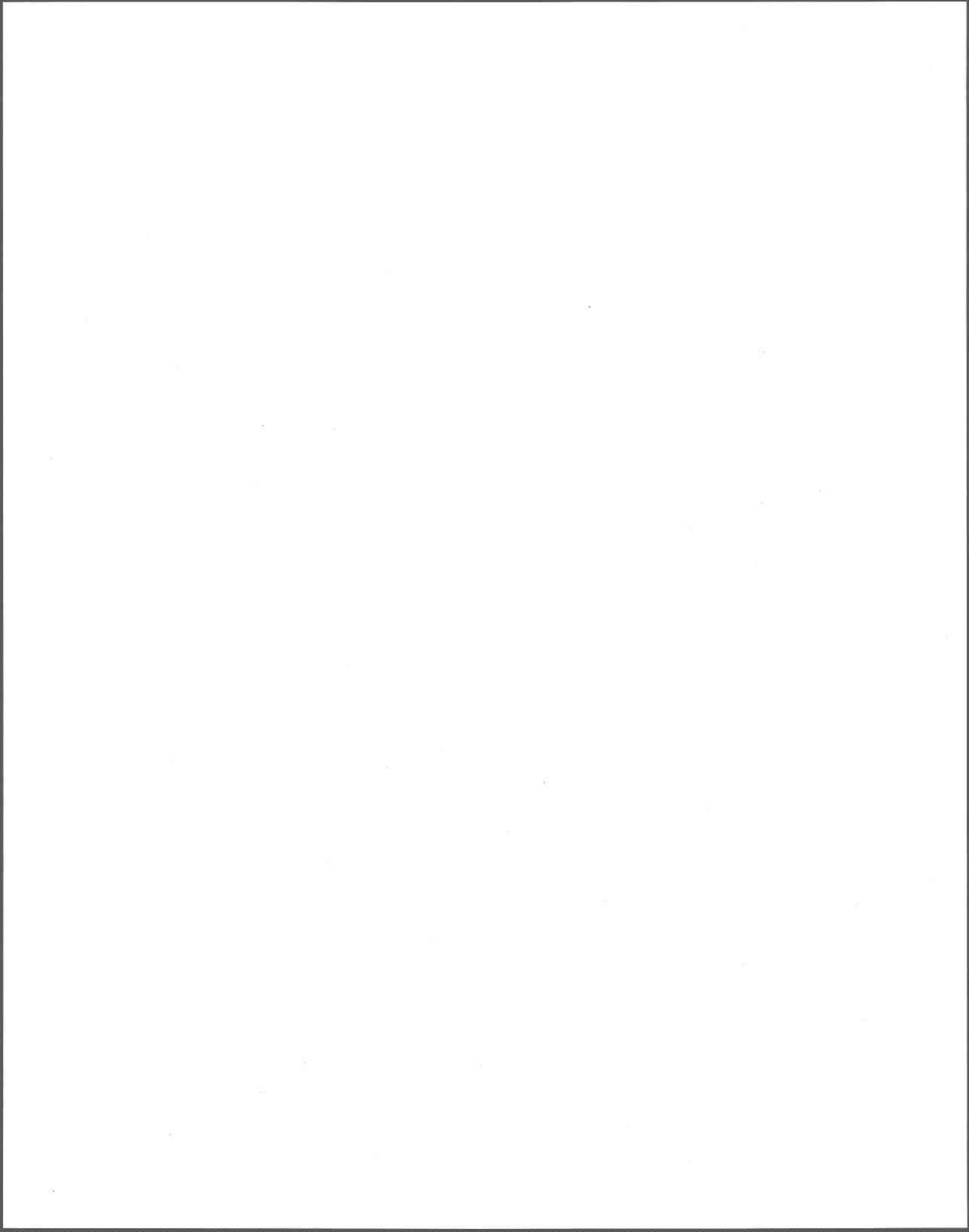


Figure B.40 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité C



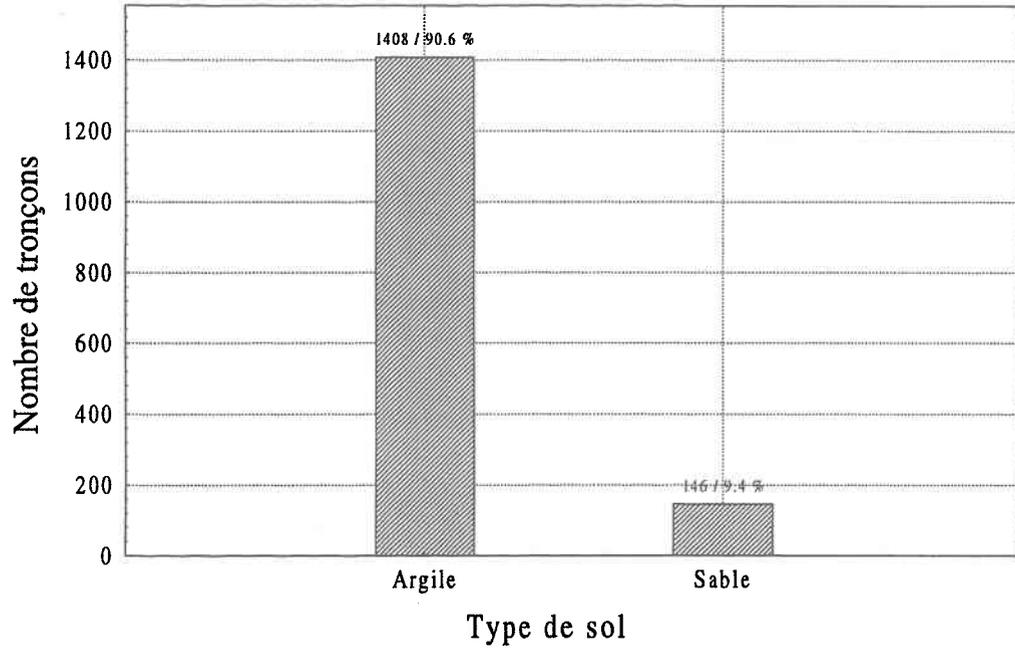


Figure B.41 Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité C

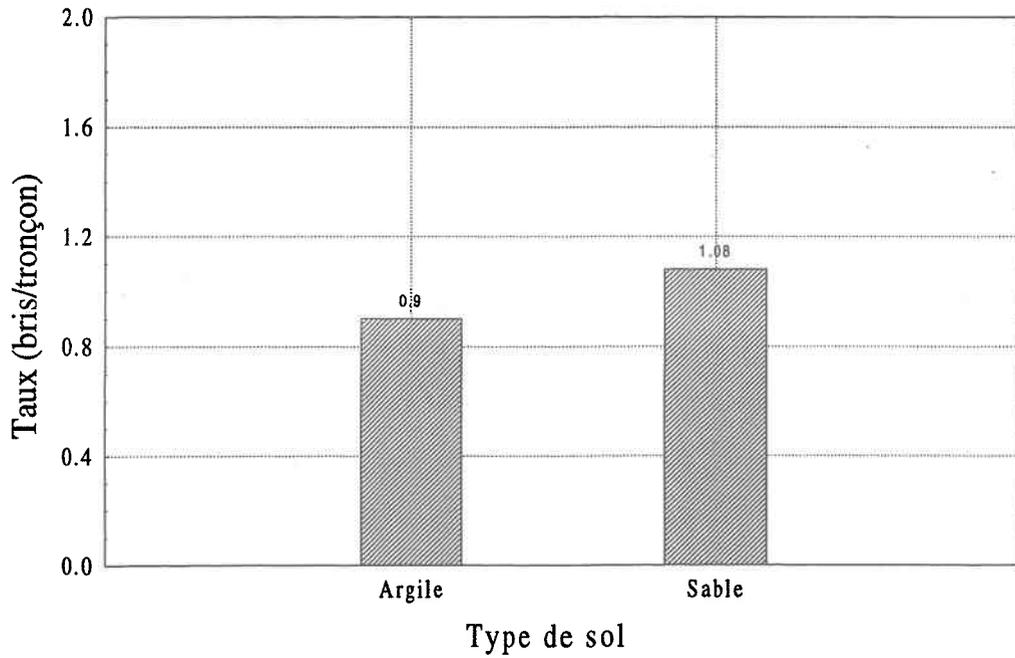
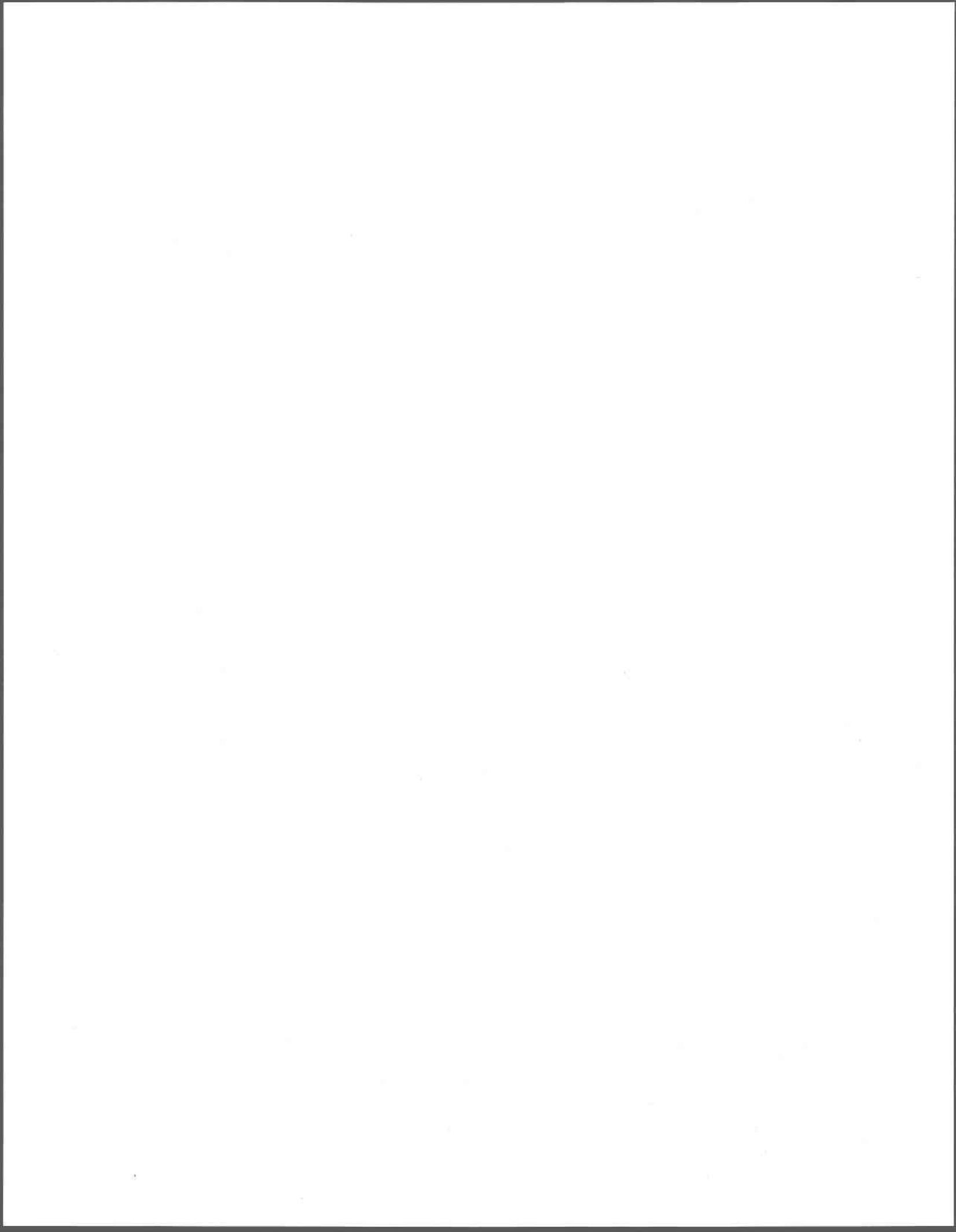


Figure B.42 Taux de bris par type de sol pour la municipalité C



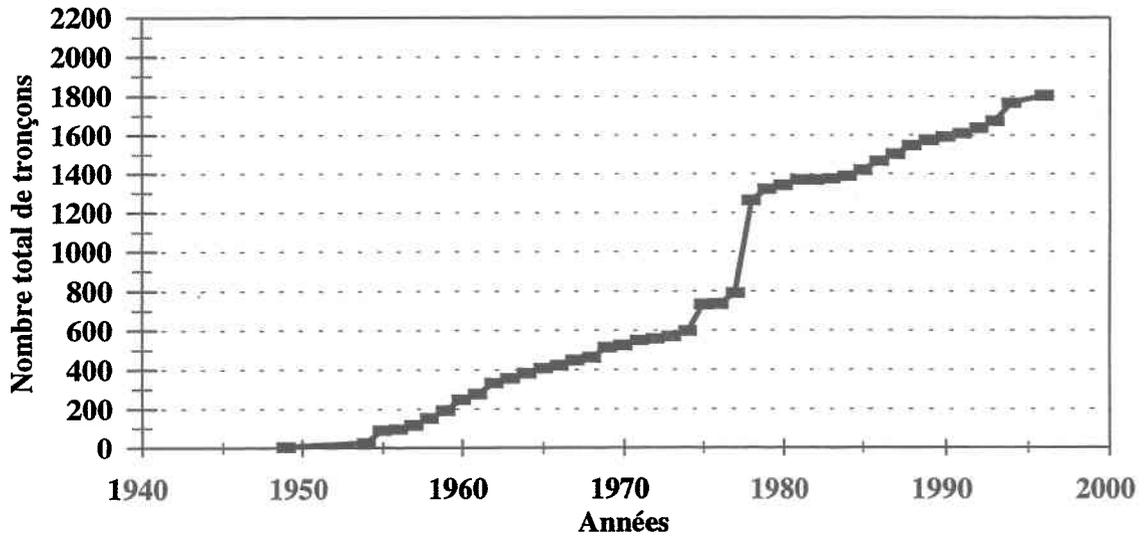


Figure B.43 Croissance de la municipalité D en terme de tronçons

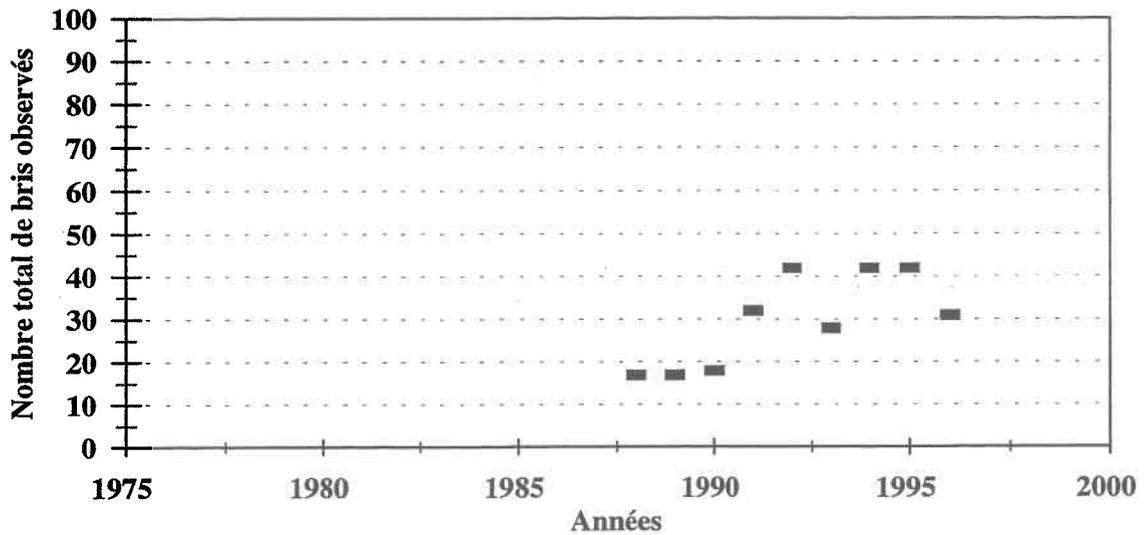
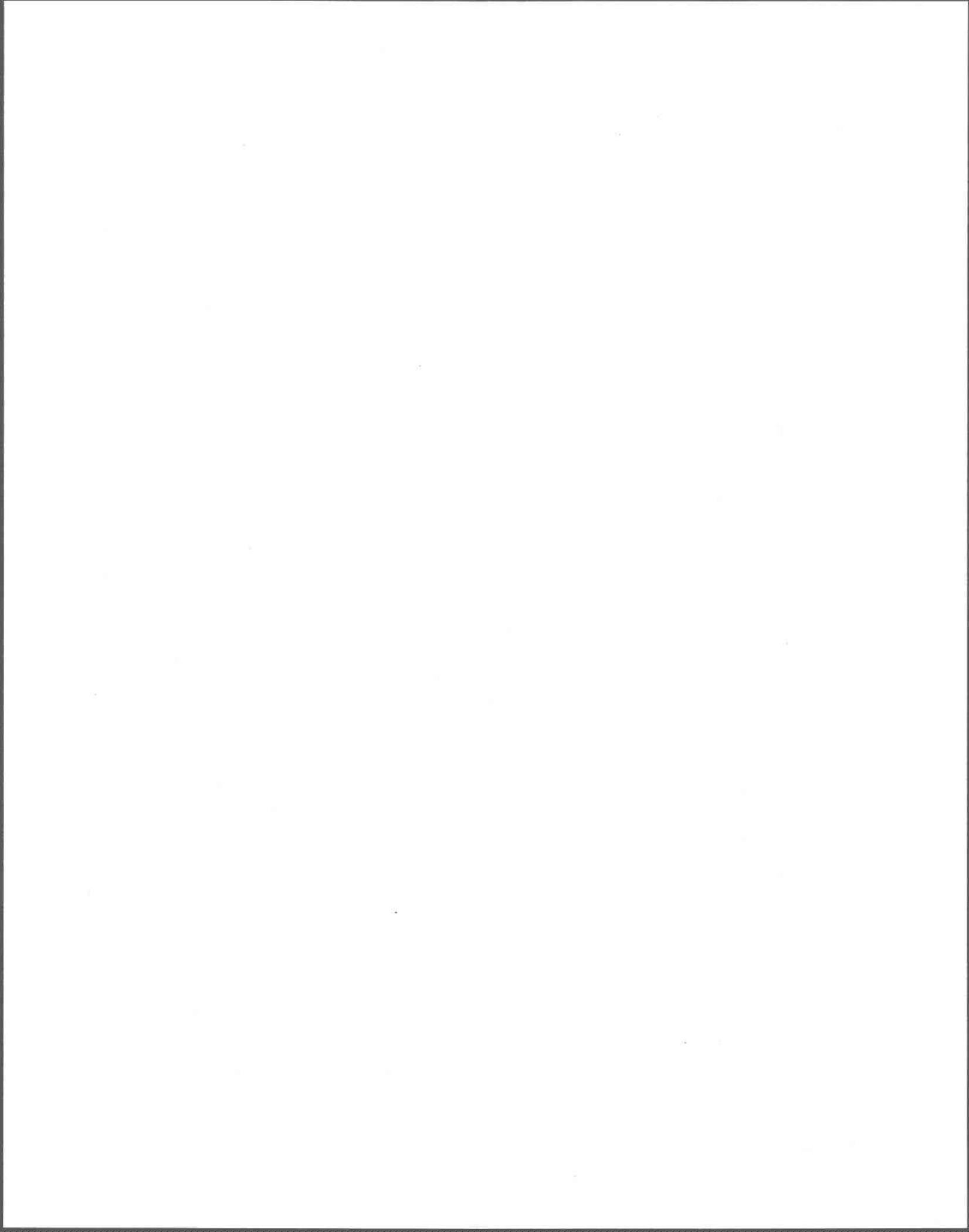


Figure B.44 Historique de bris pour la municipalité D



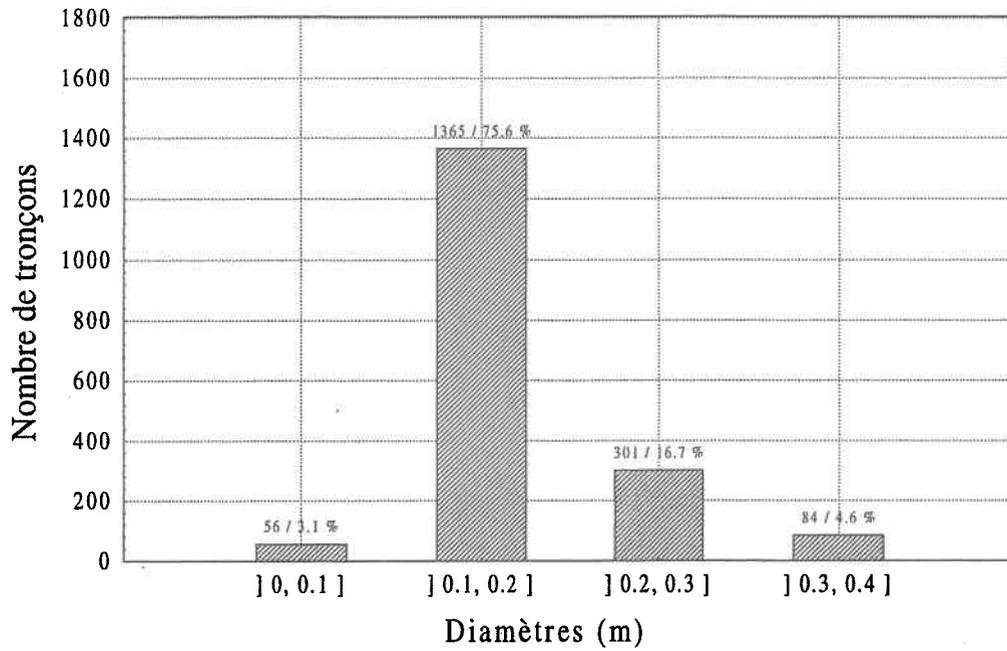


Figure B.45 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de diamètres pour la municipalité D

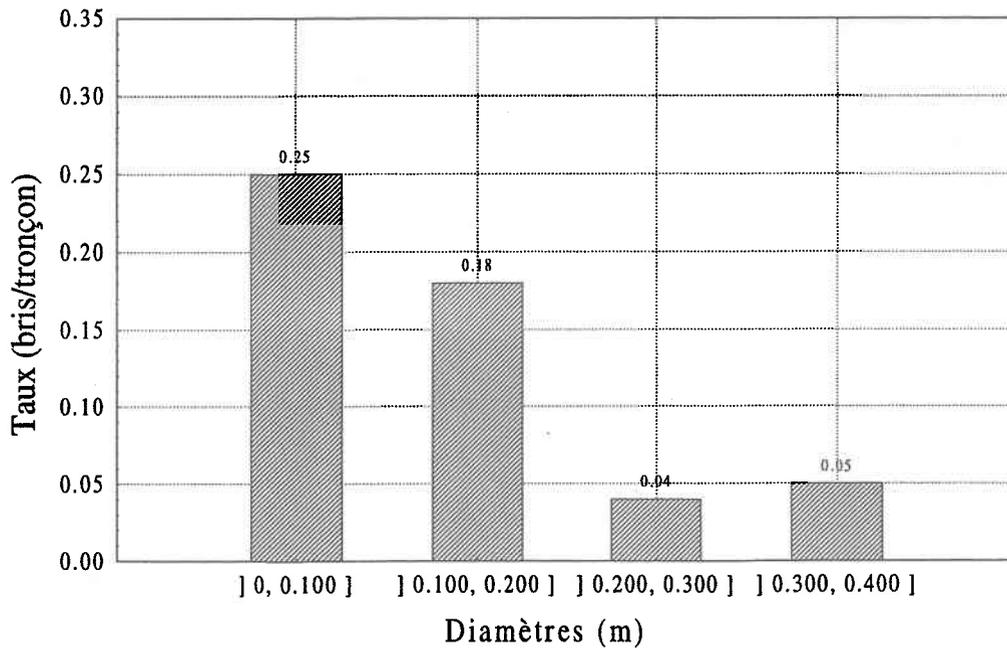
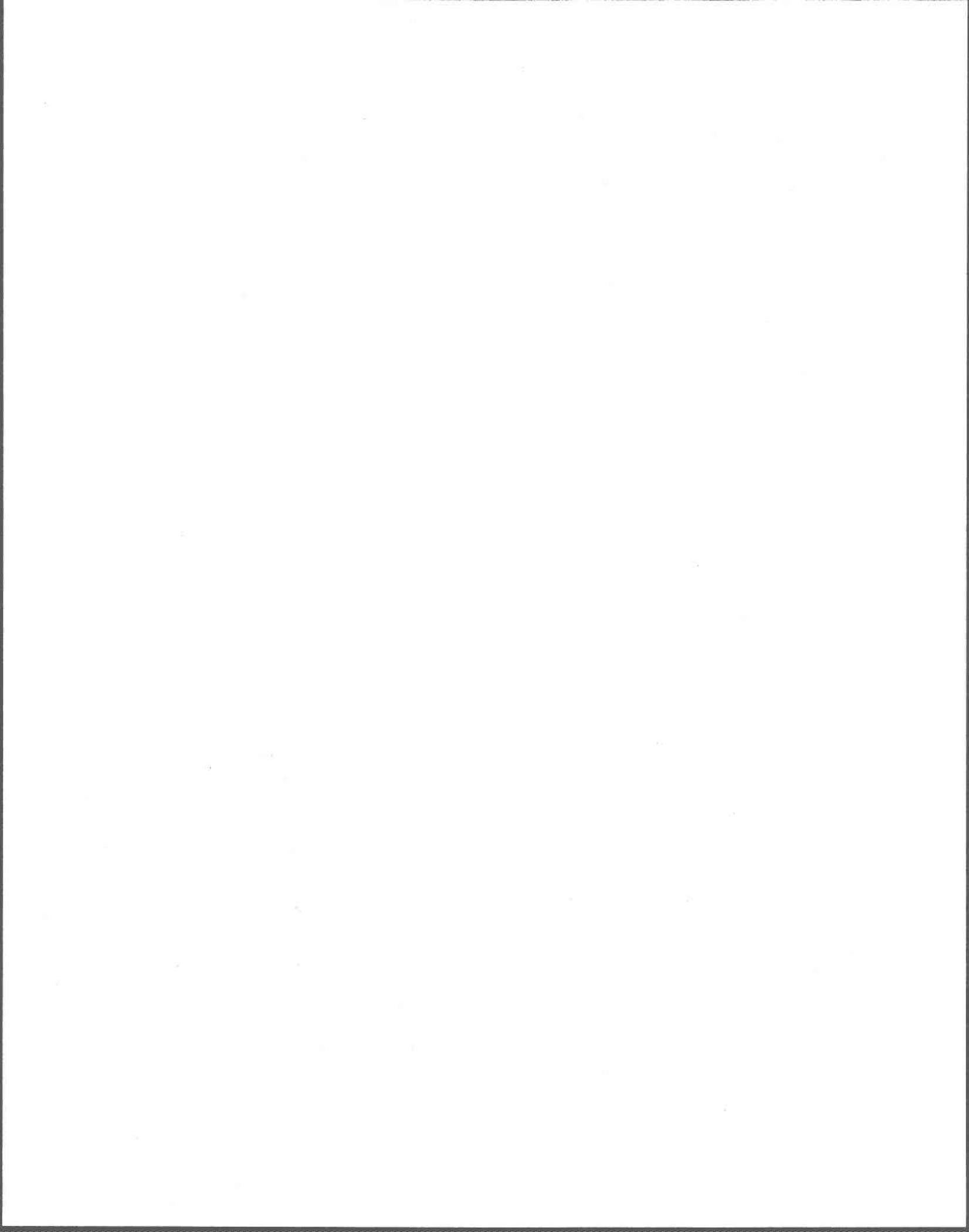


Figure B.46 Taux de bris par intervalles de diamètres pour la municipalité D



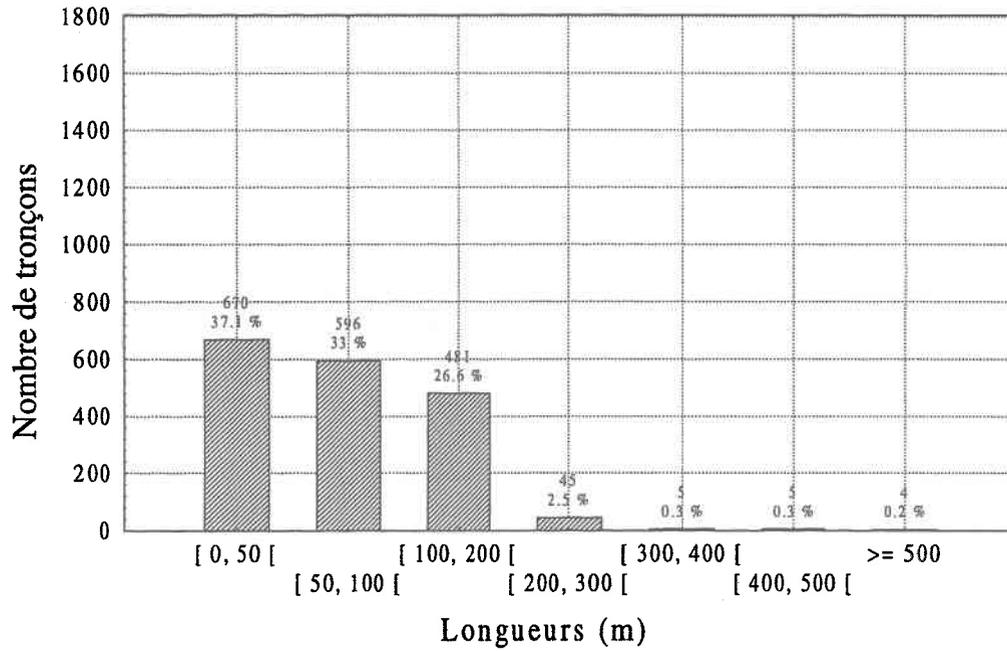


Figure B.47 Nombre et pourcentage de tronçons par intervalles de longueurs pour la municipalité D

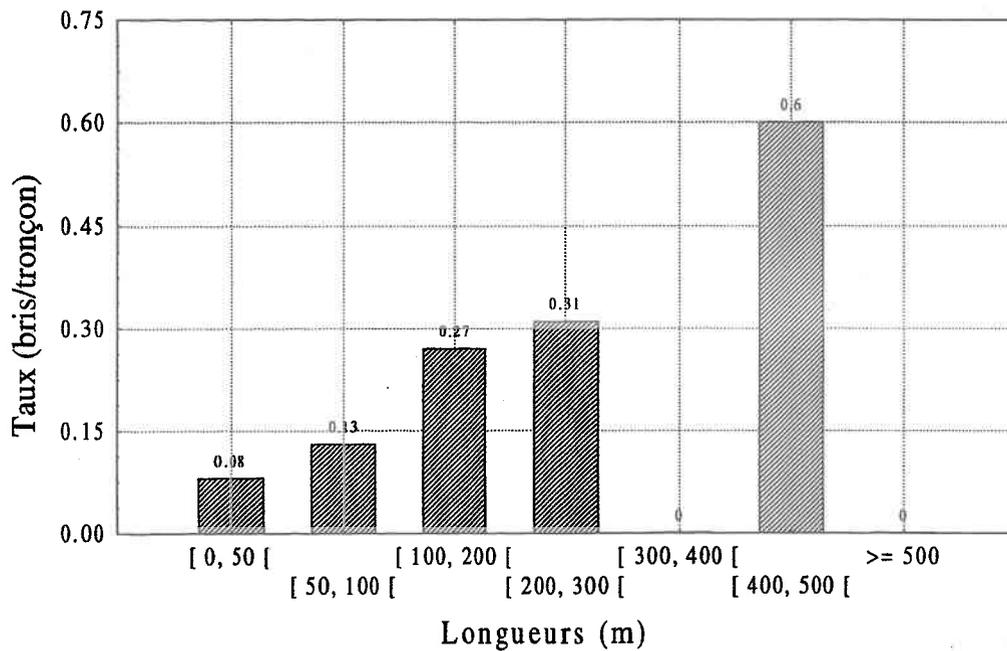
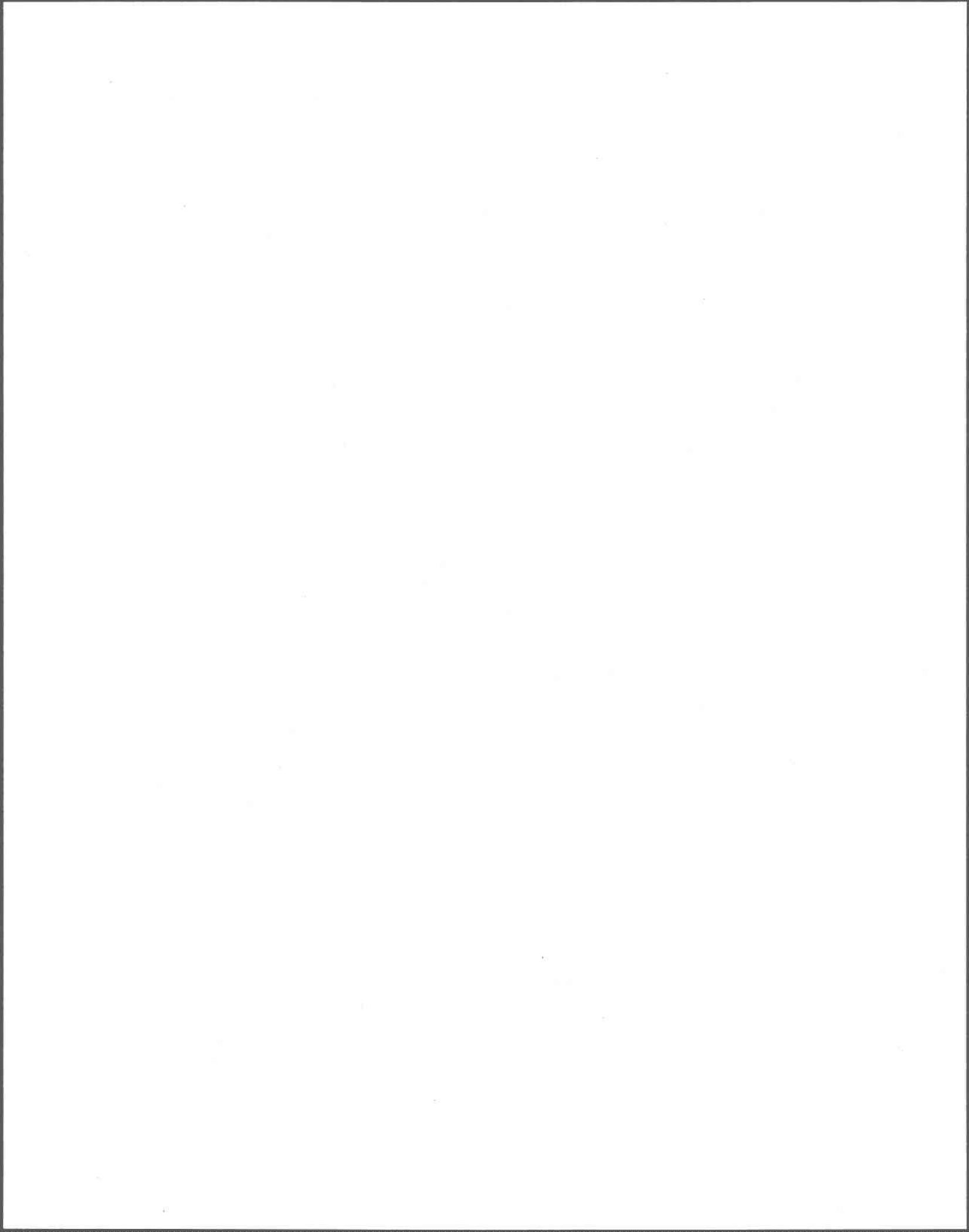


Figure B.48 Taux de bris par intervalles de longueurs pour la municipalité D



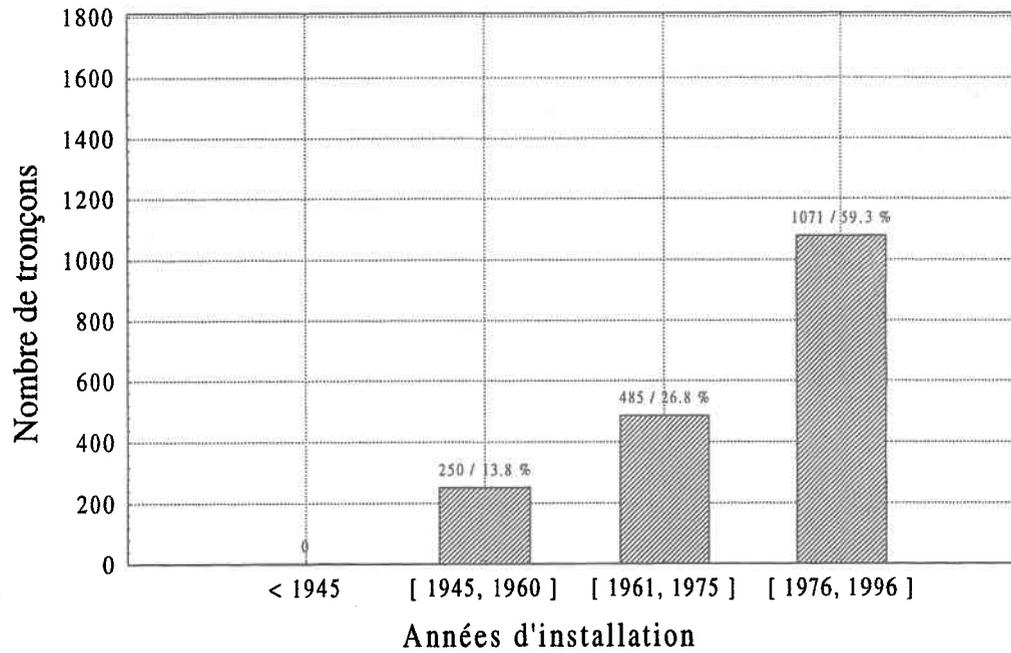


Figure B.49 Nombre et pourcentage de tronçons par périodes d'urbanisation pour la municipalité D

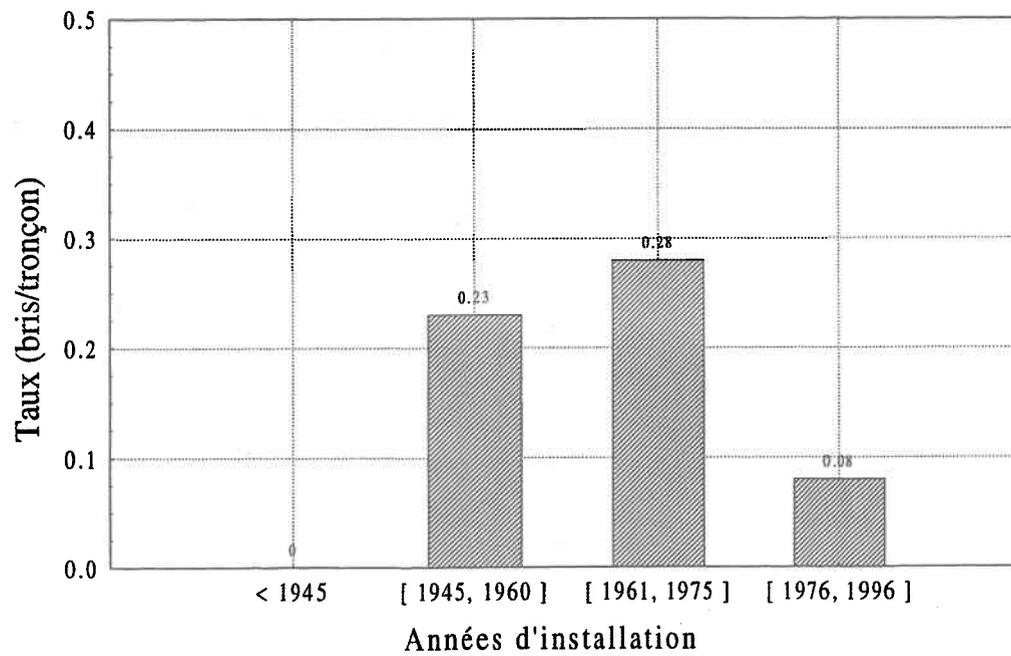
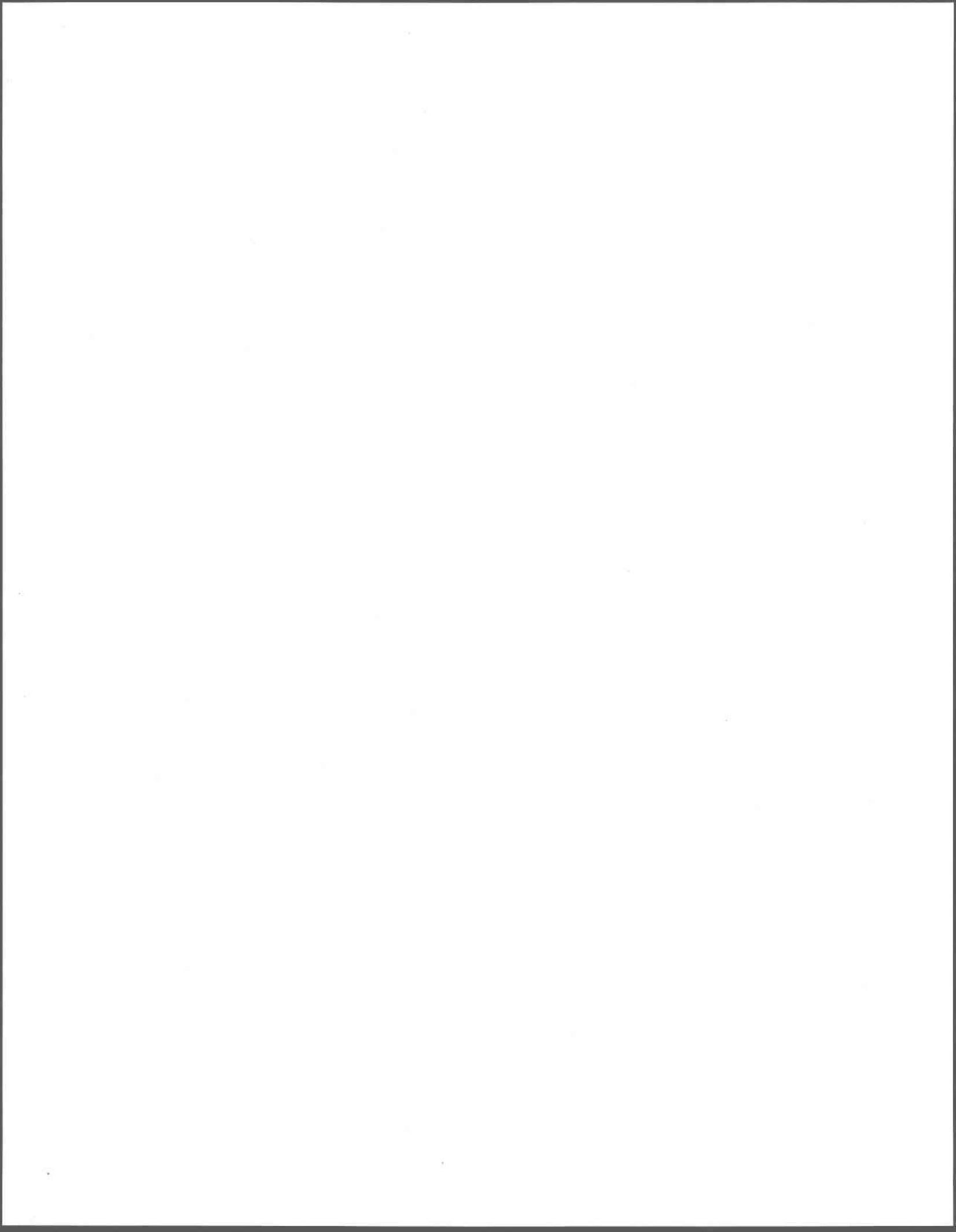


Figure B.50 Taux de bris par périodes d'urbanisation pour la municipalité D



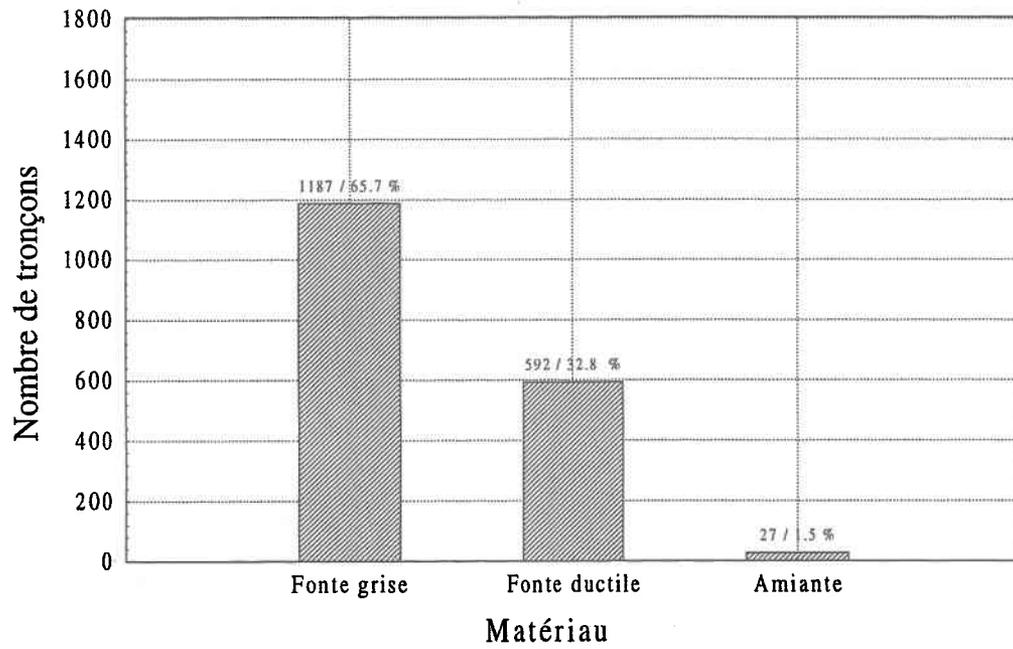


Figure B.51 Nombre et pourcentage de tronçons par type de matériau pour la municipalité D

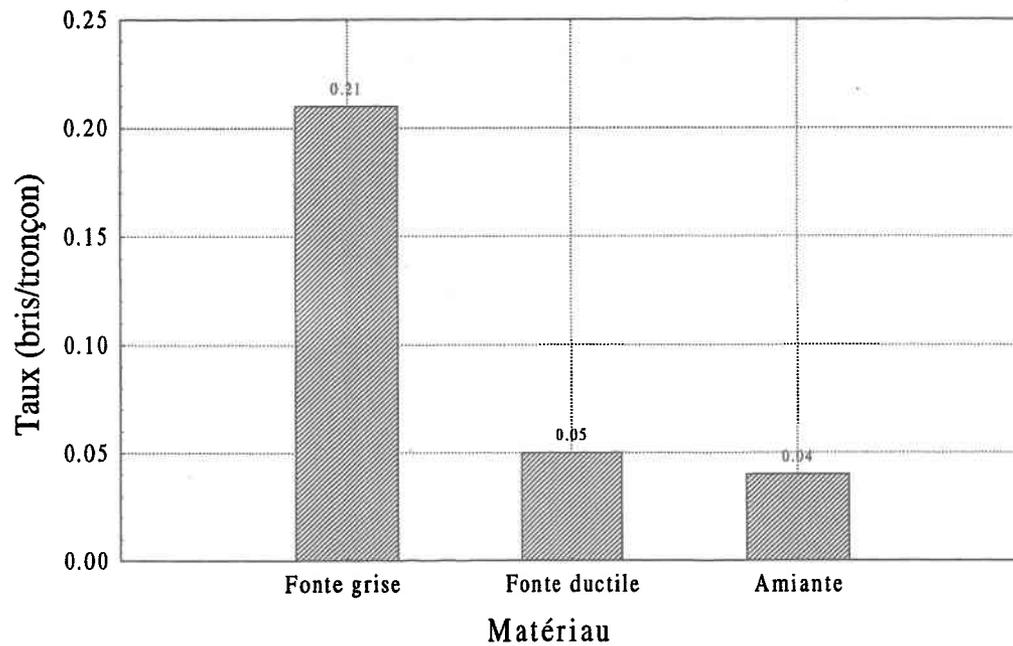
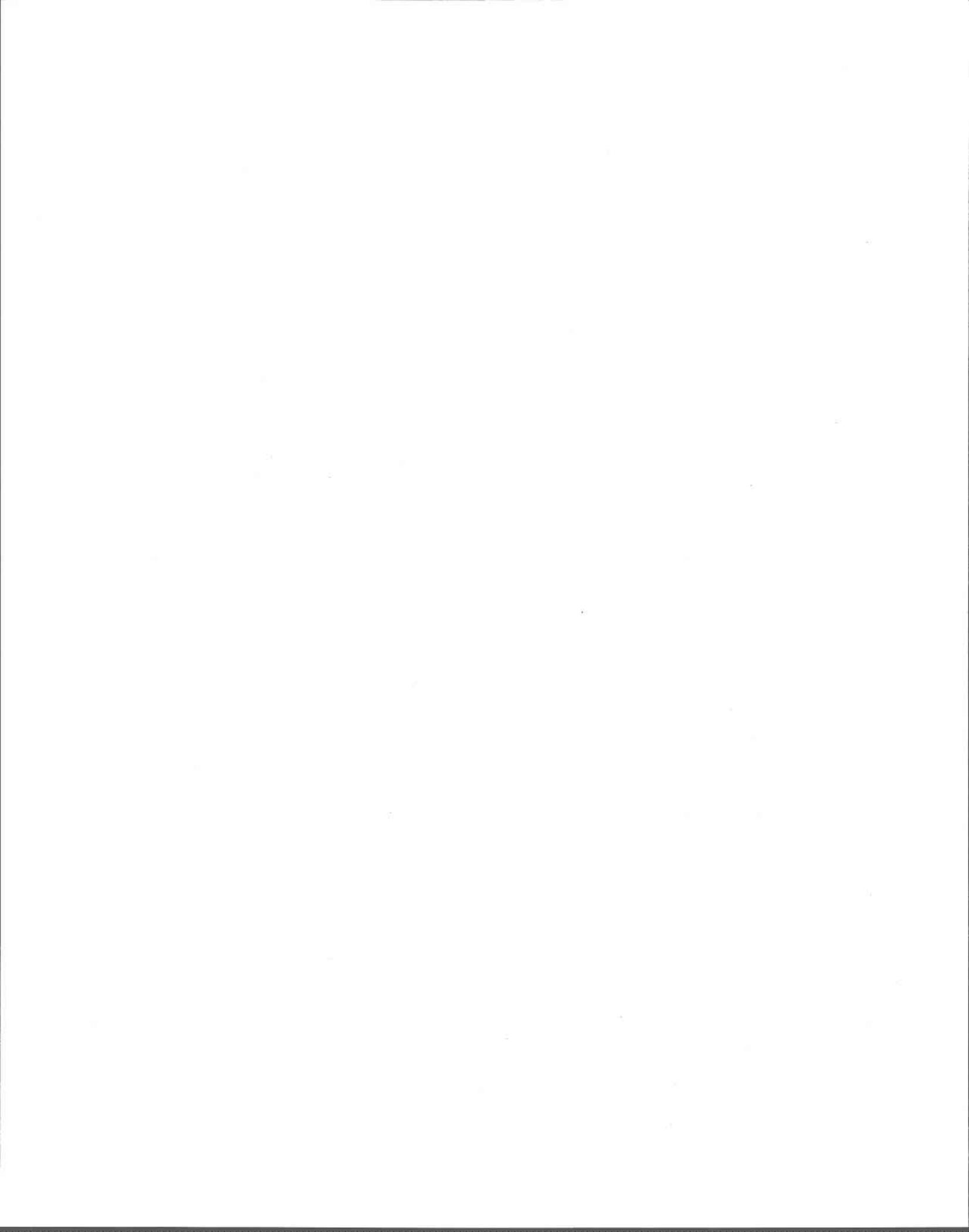


Figure B.52 Taux de bris par type de matériau pour la municipalité D



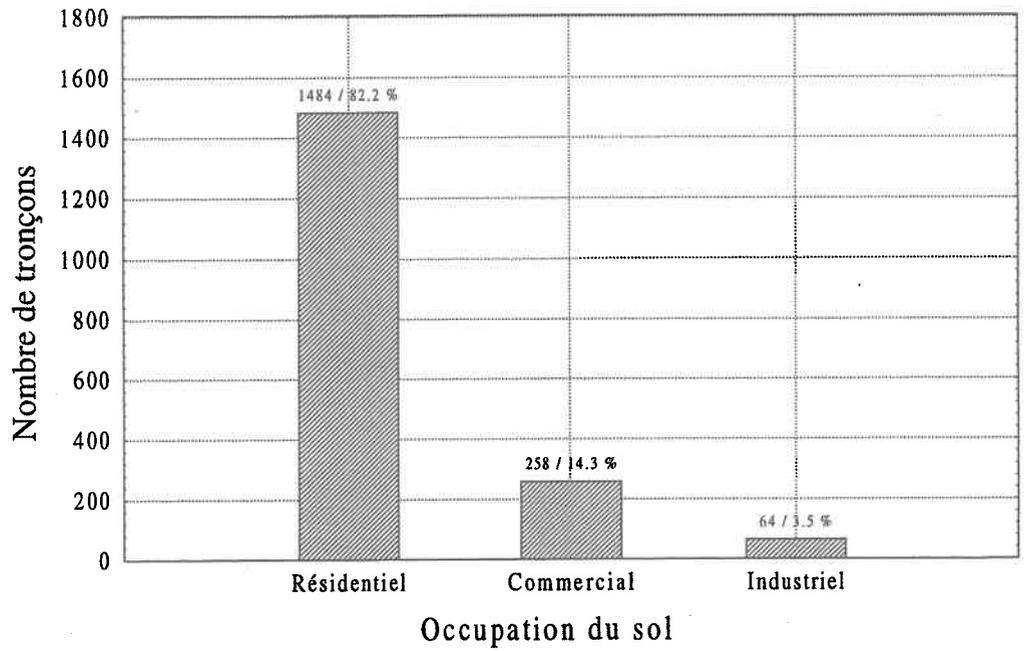


Figure B.53 Nombre et pourcentage de tronçons par type d'occupation du sol pour la municipalité D

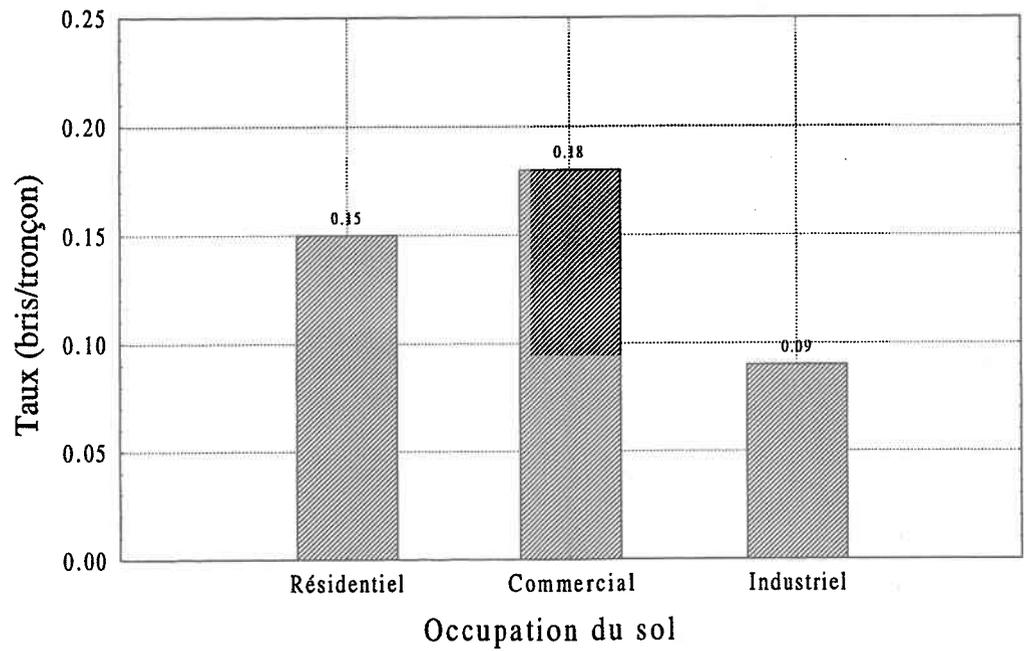
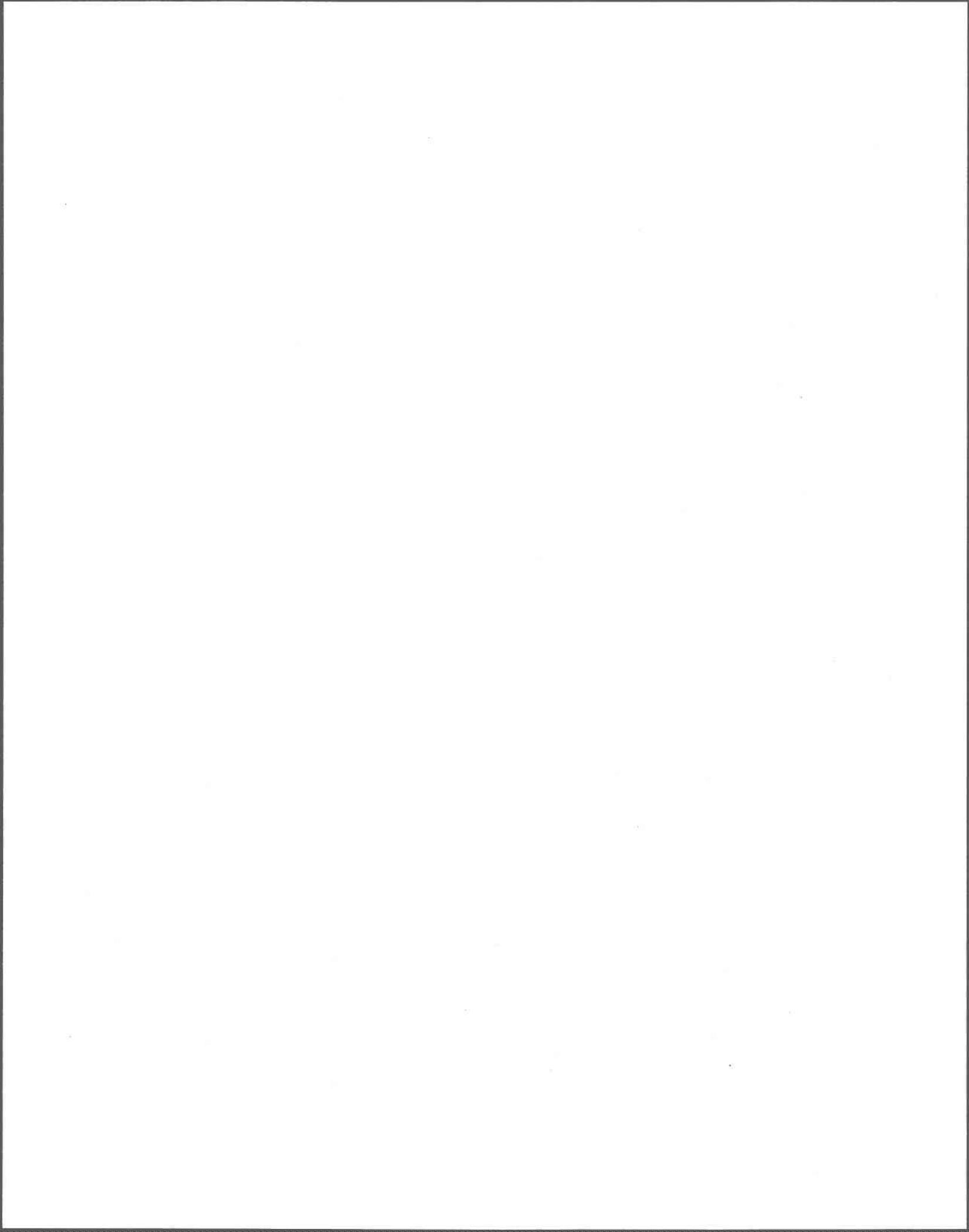


Figure B.54 Taux de bris par type d'occupation du sol pour la municipalité D



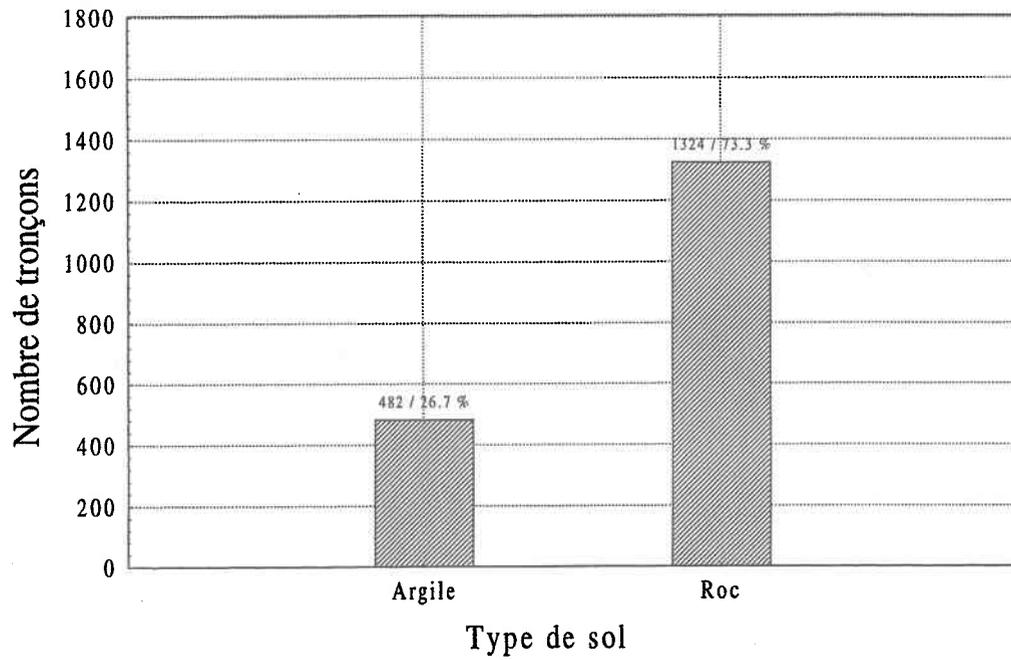


Figure B.55 Nombre et pourcentage de tronçons par type de sol pour la municipalité D

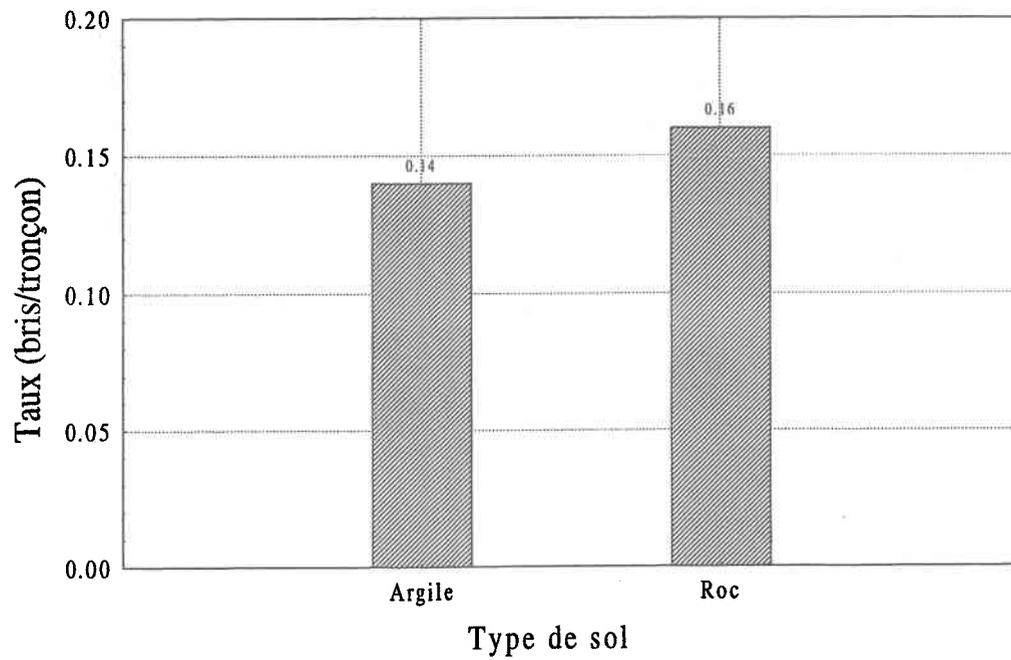
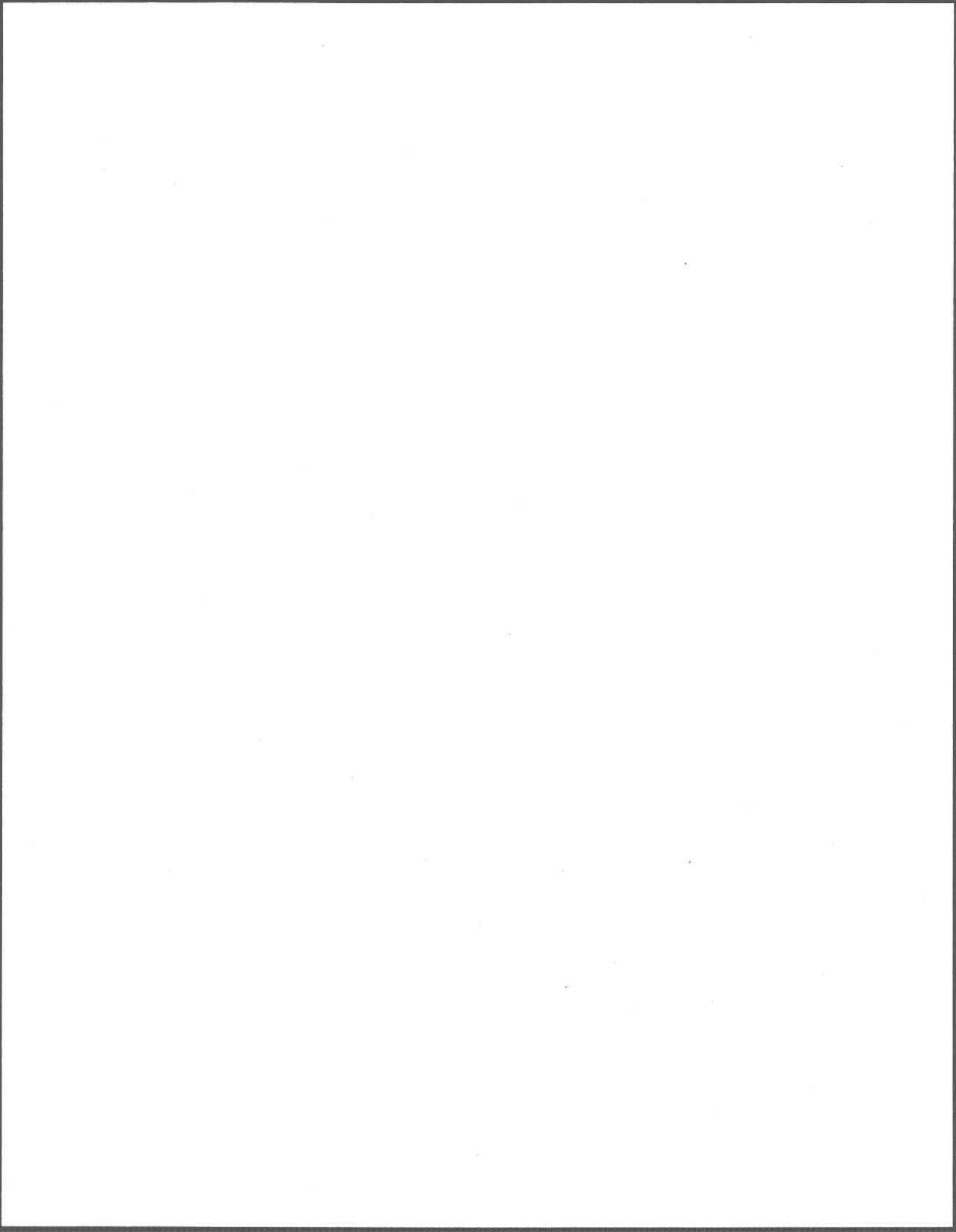
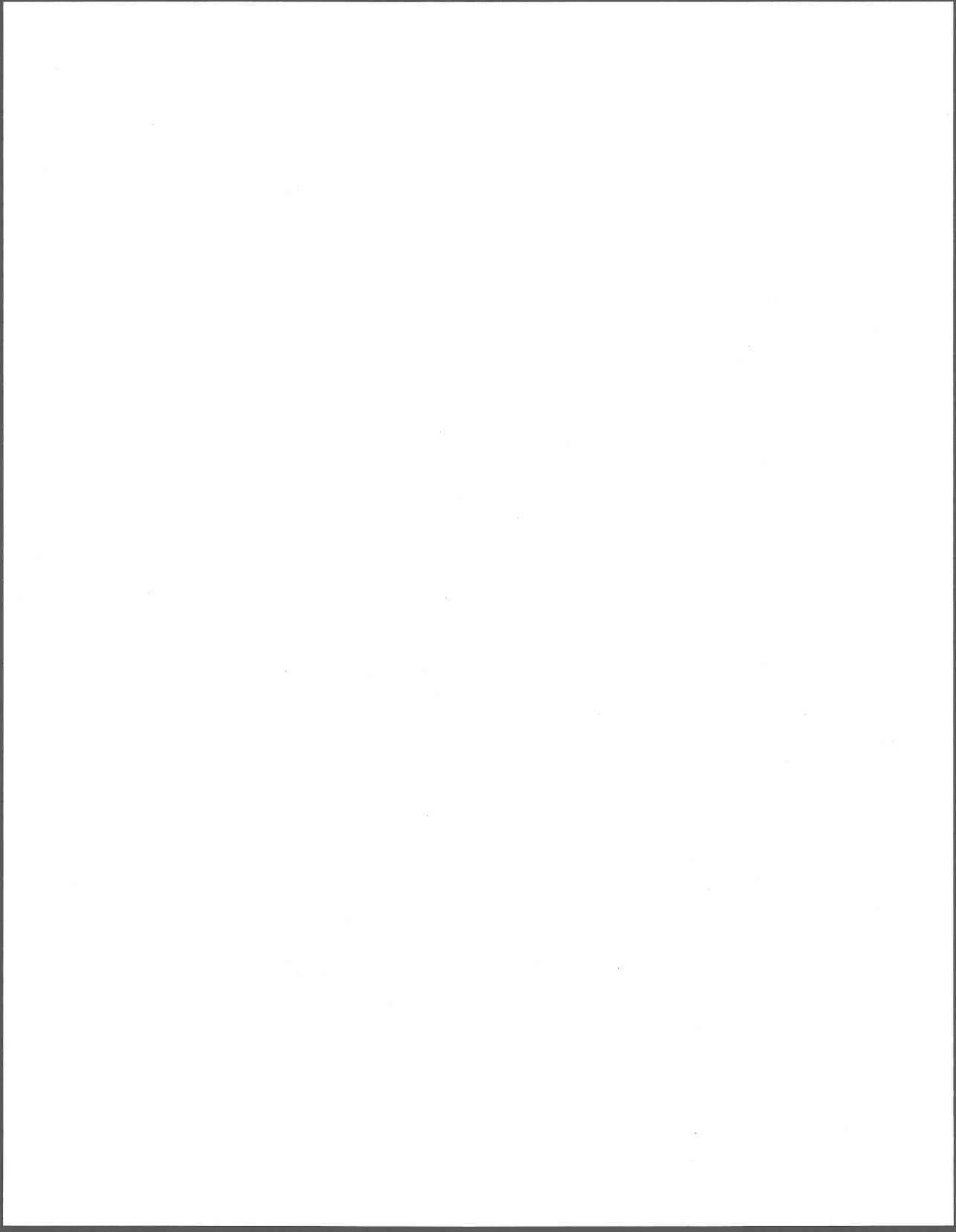


Figure B.56 Taux de bris par type de sol pour la municipalité D



APPENDICE C

**ANALYSE COMPLÉMENTAIRE RÉALISÉE
AVEC DIFFÉRENTS MODÈLES**



APPENDICE C

ANALYSE COMPLÉMENTAIRE RÉALISÉE AVEC DIFFÉRENTS MODÈLES

C.1 Résultats de calage obtenus pour différents modèles

La stratégie de calage telle que présentée dans le cadre de cette thèse a aussi été utilisée pour d'autres modèles, présentés au Tableau 6.10. Le calage a été effectué avec les données de la municipalité A avec, dans un premier temps, aucune discrimination entre les groupes de tronçons installés avant et après 1960 et les résultats sont présentés en détail dans Mailhot et al. (soumis en 1999). Les valeurs de paramètres de calage pour chacun des modèles sont présentées aux Tableaux C.1 à C.4. On retrouve, à la fin de cet appendice, les expressions de la fonction de vraisemblance pour chacun des modèles.

Pour tous les modèles présentés, la valeur du paramètre p_1 est significativement différente de 1. La strate des premiers bris a donc avantage à être modélisée par une distribution de Weibull plutôt qu'une exponentielle. La seule exception est au Tableau C.1 pour la période d'installation [1891, 1996] où la valeur de p_1 se rapproche de 1. Lorsque les deuxièmes bris sont modélisés par une distribution Weibull (Tableaux C.3 et C.4), la valeur du paramètre p_2 est souvent plus petite que 1, ce qui va à l'encontre de ce qui est attendu et physiquement explicable pour les raisons mentionnées précédemment. Par contre, dans tous les cas sauf un, la valeur de p_2 n'est pas significativement différente de 1. La distribution exponentielle est donc un meilleur choix pour modéliser les deuxièmes bris. Le cas d'exception est pour la période d'installation [1891, 1996] pour le modèle W-W-E (Tableau C.4).

Y a-t-il un gain à faire en distinguant entre un deuxième, troisième et quatrième bris plutôt que de les grouper en bris subséquents ? La distinction entre les deuxièmes bris et les bris subséquents pour le modèle W-E-E donne des valeurs des paramètres κ_2 et κ_3 significativement différentes des valeurs du paramètre κ_2 du modèle W-E. Par contre, les valeurs du paramètre κ_2 du modèle W-E sont grossièrement égales à la médiane entre les valeurs des paramètres κ_2 et κ_3 du modèle W-E-E, ce qui respecte la logique du comportement moyen modélisé. La même conclusion peut être tirée à partir des valeurs des paramètres κ_3 et κ_4 du modèle W-W-E-E par rapport aux valeurs du paramètre κ_3 du modèle.

Tableau C.1 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-E avec les données de la municipalité A

Périodes d'installation	P_1	κ_1	κ_2
[1976, 1996]	1.163	0.017	0.167
[1970, 1996]	1.213	0.018	0.148
[1965, 1996]	1.399	0.024	0.181
[1960, 1996]	1.476	0.025	0.205
[1949, 1996]	1.246	0.018	0.161
[1891, 1996]	1.062	0.015	0.147

Tableau C.2 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-E-E avec les données de la municipalité A

Périodes d'installation	P_1	κ_1	κ_2	κ_3
[1976, 1996]	1.155	0.017	0.076	0.331
[1970, 1996]	1.193	0.018	0.078	0.246
[1965, 1996]	1.369	0.024	0.082	0.291
[1960, 1996]	1.461	0.025	0.075	0.342
[1949, 1996]	1.249	0.020	0.048	0.284
[1891, 1996]	1.154	0.018	0.038	0.261

Tableau C.3 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-W-E avec les données de la municipalité A

Périodes d'installation	P₁	P₂	κ₁	κ₂	κ₃
[1976, 1996]	1.155	0.924	0.017	0.070	0.347
[1970, 1996]	1.200	0.999	0.018	0.077	0.255
[1965, 1996]	1.380	1.013	0.024	0.080	0.301
[1960, 1996]	1.469	1.043	0.025	0.074	0.352
[1949, 1996]	1.328	0.921	0.020	0.046	0.283
[1891, 1996]	1.231	0.779	0.019	0.030	0.260

Tableau C.4 Valeurs des paramètres de calage par périodes d'installation pour le modèle W-W-E-E avec les données de la municipalité A

Périodes d'installation	P₁	P₂	κ₁	κ₂	κ₃	κ₄
[1976, 1996]	1.157	0.922	0.017	0.070	0.166	0.521
[1970, 1996]	1.184	0.991	0.018	0.079	0.130	0.374
[1965, 1996]	1.342	0.993	0.023	0.084	0.140	0.407
[1960, 1996]	1.404	1.008	0.025	0.081	0.119	0.494
[1949, 1996]	1.243	0.955	0.020	0.061	0.071	0.438
[1891, 1996]	1.123	0.917	0.018	0.055	0.049	0.420

Dans le cadre de l'article de Mailhot et al. (soumis en 1999), une méthodologie a aussi été présentée qui permet de déterminer si les écarts entre les distributions de Weibull et exponentielle sont statistiquement significatifs. Le Tableau C.5 présente les bornes inférieures et supérieures ainsi que la moyenne obtenue pour un intervalle de confiance de 95% sur la valeur du paramètre p_2 du modèle W-W-E. Lorsque l'intervalle de confiance comprend la valeur "1", alors la différence entre les distributions de Weibull et exponentielle n'est pas significative à ce niveau de confiance. Au Tableau C.5, seule la période d'installation [1891, 1996] justifierait l'utilisation d'une distribution Weibull pour modéliser les deuxièmes bris. Par contre, la valeur de p_2 inférieure à 1 nous indique qu'une analyse plus poussée doit être réalisée.

Tableau C.5 Intervalle de confiance à 95 % sur le paramètre p_2 du modèle W-W-E par périodes d'installation avec les données de la municipalité A

Périodes d'installation	Minimum	Moyenne	Maximum
[1976, 1996]	0.692	0.924	1.195
[1970, 1996]	0.825	0.999	1.196
[1960, 1996]	0.915	1.043	1.185
[1949, 1996]	0.853	0.968	1.107
[1891, 1996]	0.711	0.779	0.924

C.2 Expressions de la fonction de vraisemblance

Les expressions obtenues pour la fonction de vraisemblance des différents modèles du Tableau 6.10 sont présentées dans ce qui suit.

C.2.1 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-E-E

La fonction de vraisemblance s'écrit dans ce cas :

$$\ln L = \sum_{i \Leftrightarrow \beta=0} \ln \bar{P}_i(0) + \sum_{i \Leftrightarrow \beta=1} \ln \bar{P}_i(1) + N \ln \kappa_3 + \sum_{i \Leftrightarrow \beta \geq 2} \ln K_i \quad (\text{C.1})$$

où

$\bar{P}_i(0)$ est la probabilité d'observer aucun bris durant la période archivée pour le tronçon i ;

$\bar{P}_i(1)$ est la probabilité d'observer un bris durant la période archivée pour le tronçon i ;

N est égal à $[N_{Total} + X_0 - X_{total}]$;

N_{total} est le nombre total de bris sur le réseau;

X_0 est le nombre de tronçons n'ayant subi aucun bris;

X_{total} est le nombre total de tronçons sur le réseau; et

K_i est la probabilité d'observer deux bris ou plus durant la période archivée pour le tronçon i .

La première somme de l'Équation C.1 porte sur les tronçons n'ayant pas subi de bris, la deuxième porte sur ceux en ayant subi un seul et la dernière porte sur ceux en ayant subi deux ou plus. On a pour les différents termes (afin d'alléger l'équation, l'indice i pour le tronçon est omis mais s'applique à tous les termes de temps, soit : T_b , T_a , T_1 et T_2) :

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(0) = & \exp[-(\kappa_1 T_a)^p] + p \kappa_1^p \left\{ \exp(-\kappa_2 T_a) - \exp(-\kappa_3 T_a) \exp[T_b(\kappa_3 - \kappa_2)] \right\} I \\ & + \exp[\kappa_3(T_b - T_a)] \{1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^p]\} \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(1) = p \kappa_1^p T_1^{p-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^p] \exp[-\kappa_2(T_a - T_1)] + p \kappa_1^p \kappa_2 \exp[T_1(\kappa_3 - \kappa_2)] \exp[-T_a \kappa_3] I \\ + \kappa_3 \exp[\kappa_3(T_b - T_a)] \{ (1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^p]) - p \kappa_1^p \exp(-\kappa_2 T_b) I \} \end{aligned} \quad (C.3)$$

où

- T_a est le temps d'analyse;
 T_b est le temps de début d'archivage des bris;
 T_1 est le temps au premier bris;
 T_2 est le temps au deuxième bris; et

$$I = \int_0^{T_b} dt (t)^{p-1} \exp[-(\kappa_1 t)^p] \exp(\kappa_2 t) \quad (C.4)$$

Après développement, on obtient :

$$\begin{aligned} K_i = p \kappa_1^p T_1^{p-1} \kappa_2 \exp[-(\kappa_1 T_1)^p] \exp[T_2(\kappa_3 - \kappa_2)] \exp(-\kappa_3 T_a) \exp(\kappa_2 T_1) + \\ \kappa_3 p \kappa_1^p \kappa_2 \exp[T_1(\kappa_3 - \kappa_2)] \exp[-T_a \kappa_3] I \\ + \kappa_3^2 \exp[\kappa_3(T_b - T_a)] \{ (1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^p]) - p \kappa_1^p \exp(-\kappa_2 T_b) I \} \end{aligned} \quad (C.5)$$

C.2.2 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-W-E

La fonction de vraisemblance s'écrit dans ce cas :

$$\ln L = \sum_{i \Leftrightarrow \beta=0} \ln \bar{P}_i(0) + \sum_{i \Leftrightarrow \beta=1} \ln \bar{P}_i(1) + N \ln \kappa_3 + \sum_{i \Leftrightarrow \beta \geq 2} \ln K_i \quad (\text{C.6})$$

pour laquelle :

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(0) = & \exp[-(\kappa_1 T_a)^{p_1}] + p_1 \kappa_1^{p_1} I_1 - p_1 \kappa_1^{p_1} \exp[-\kappa_3(T_a - T_b)] I_2 \\ & + \exp[-\kappa_3(T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]\} \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(1) = & p_1 \kappa_1^{p_1} T_1^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_a - T_1)]^{p_2}\} + p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \exp[-\kappa_3(T_a - T_1)] I_3 \\ & + \kappa_3 \exp[-\kappa_3(T_a - T_b)] \{(1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]) - p_1 \kappa_1^{p_1} I_2\} \end{aligned} \quad (\text{C.8})$$

où

$$I_1 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_a - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.9})$$

$$I_2 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_b - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.10})$$

$$I_3 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] (T_1 - t)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2(T_1 - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.11})$$

Après développement, on obtient :

$$K_i = p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \left\{ T_1^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^{p_1}] (T_2 - T_1)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2 (T_2 - T_1)]^{p_2}\} \exp[-\kappa_3 (T_a - T_2)] + \right. \\ \left. \kappa_3 \exp[-\kappa_3 (T_a - T_1)] I_3 \right\} + \kappa_3^2 \exp[-\kappa_3 (T_a - T_b)] \{(1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]) - p_1 \kappa_1^{p_1} I_2\} \quad (\text{C.12})$$

C.2.3 Fonction de vraisemblance pour le modèle W-W-E-E

La fonction de vraisemblance s'écrit dans ce cas :

$$\ln L = \sum_{i \Leftrightarrow \beta=0} \ln \bar{P}_i(0) + \sum_{i \Leftrightarrow \beta=1} \ln \bar{P}_i(1) + \sum_{i \Leftrightarrow \beta=2} \ln \bar{P}_i(2) + N' \ln \kappa_4 + \sum_{i \Leftrightarrow \beta \geq 3} \ln K_i \quad (\text{C.13})$$

où

N' est égal à $[N_{Total} - 3(X_{Total} - X_0) + 2X_1 + X_2]$;

X_1 est le nombre de tronçons ayant subi un bris; et

X_2 est le nombre de tronçons ayant subi deux bris;

et

$$\bar{P}_i(0) = \exp[-(\kappa_1 T_a)^{p_1}] + \exp[-\kappa_4 (T_a - T_b)] \{1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]\} + \\ p_1 \kappa_1^{p_1} \{I_3 - \exp[\kappa_4 (T_a - T_b)] I_1 + p_2 \kappa_2^{p_2} I_2 [\exp(-\kappa_3 T_a) - \exp[-\kappa_4 (T_a - T_b)]] \exp(-\kappa_3 T_b)\} \quad (\text{C.14})$$

où

$$I_2 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] \int_t^{T_b} dt' (t'-t)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2 (t'-t)]^{p_2}\} \exp(\kappa_3 t') \quad (\text{C.15})$$

$$I_3 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_a - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.16})$$

et

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(1) = & \kappa_4 \exp[-\kappa_4(T_a - T_b)](1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]) + \\ & p_1 \kappa_1^{p_1} \{ T_1^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_a - T_1)]^{p_2}\} + p_2 \kappa_2^{p_2} \exp[-\kappa_3(T_a - T_1)] I_4 \\ & - \kappa_4 \exp[-\kappa_4(T_a - T_b)] I_1 + p_2 \kappa_2^{p_2} I_2 [\kappa_3 \exp[-\kappa_4(T_a - T_1)] \exp(-\kappa_3 T_1) \\ & - \kappa_4 \exp[-\kappa_4(T_a - T_b)] \exp(-\kappa_3 T_b)] \} \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

où

$$I_1 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] \exp\{-[\kappa_2(T_b - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.18})$$

$$I_4 = \int_0^{T_b} dt (t)^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 t)^{p_1}] (T_1 - t)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2(T_1 - t)]^{p_2}\} \quad (\text{C.19})$$

et

$$\bar{P}_i(2) = \bar{P}_i(0,2) + \bar{P}_i(1,2) + \kappa_4 \bar{P}_i(2,1) + \kappa_4^2 \sum_{\beta=3}^{\infty} \bar{P}_i(\beta,0) \quad (\text{C.20})$$

où

$$\begin{aligned} \bar{P}_i(0,2) = p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} T_1^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^{p_1}] (T_2 - T_1)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2 (T_2 - T_1)]^{p_2}\} \\ \exp[-\kappa_3 (T_a - T_2)] \end{aligned} \quad (\text{C.21})$$

$$\bar{P}_i(1,2) = p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \kappa_3 \exp[-\kappa_3 (T_2 - T_1)] \exp[-\kappa_4 (T_a - T_2)] I_4 \quad (\text{C.22})$$

$$\bar{P}_i(2,1) = p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \kappa_3 \exp[-\kappa_4 (T_a - T_1)] \exp(-\kappa_3 T_1) I_2 \quad (\text{C.23})$$

$$\begin{aligned} \kappa_4^2 \sum_{\beta=3}^{\infty} \bar{P}_i(\beta,0) = \kappa_4^2 \exp[-\kappa_4 (T_a - T_b)] \\ \left\{ (1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]) - p_1 \kappa_1^{p_1} I_1 - p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \exp(-\kappa_3 T_b) I_2 \right\} \end{aligned} \quad (\text{C.24})$$

$$K_i = \bar{P}_i(0,3) + \kappa_4 \bar{P}_i(1,2) + \kappa_4^2 \bar{P}_i(2,1) + \kappa_4^3 \sum_{\beta=3}^{\infty} \bar{P}_i(\beta,0) \quad (\text{C.25})$$

avec

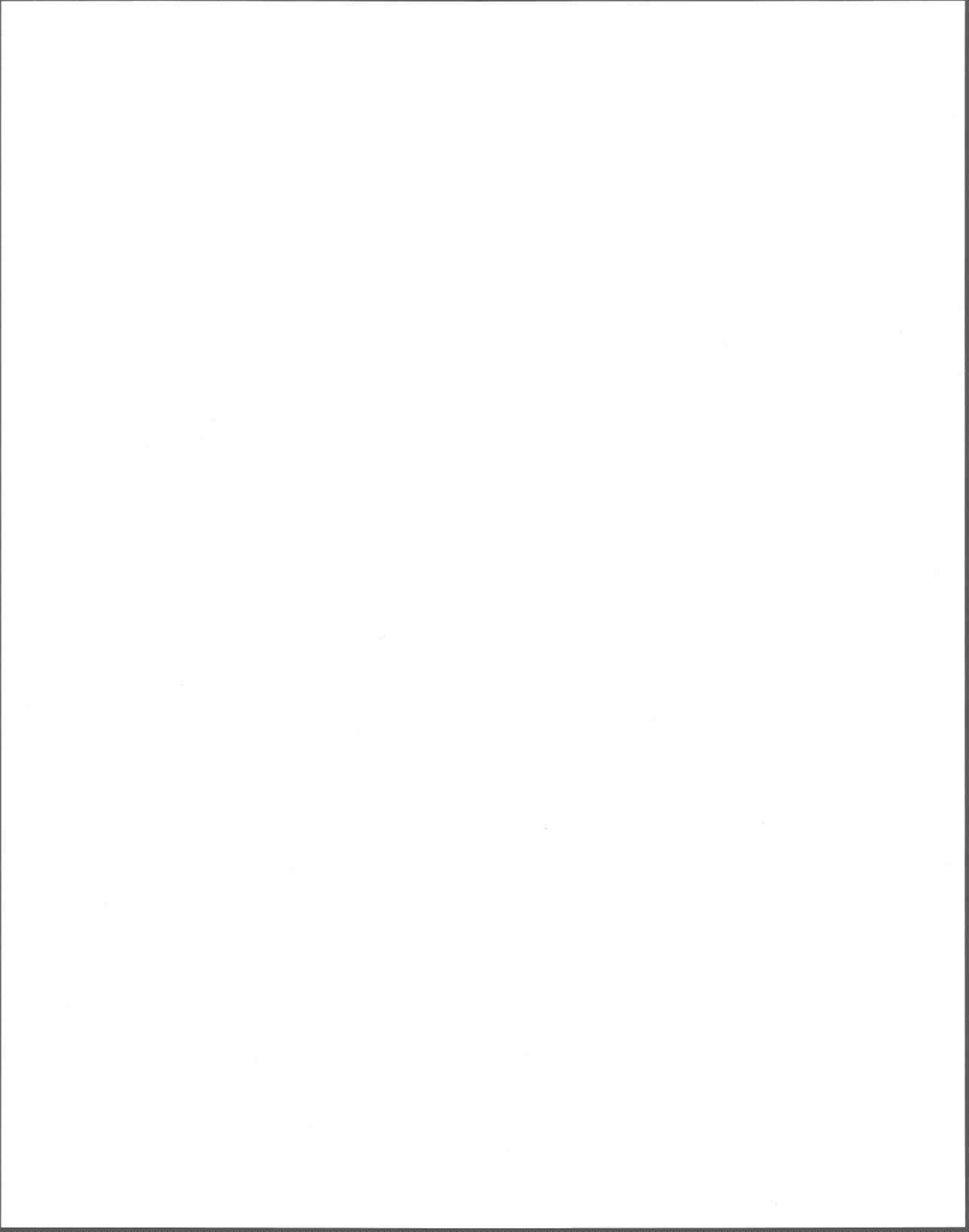
$$\begin{aligned} \bar{P}_i(0,3) = & \kappa_3 p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} T_1^{p_1-1} \exp[-(\kappa_1 T_1)^{p_1}] (T_2 - T_1)^{p_2-1} \exp\{-[\kappa_2 (T_2 - T_1)]^{p_2}\} \\ & \exp[-\kappa_3 (T_3 - T_2)] \exp[-\kappa_4 (T_a - T_3)] \end{aligned} \quad (\text{C.26})$$

où

T_3 est le temps au troisième bris.

De plus,

$$\begin{aligned} \kappa_4^3 \sum_{\beta=3}^{\infty} \bar{P}_i(\beta,0) = & \kappa_4^3 \exp[-\kappa_4 (T_a - T_b)] \\ & \{ (1 - \exp[-(\kappa_1 T_b)^{p_1}]) - p_1 \kappa_1^{p_1} I_1 - p_1 p_2 \kappa_1^{p_1} \kappa_2^{p_2} \exp(-\kappa_3 T_b) I_2 \} \end{aligned} \quad (\text{C.27})$$



LISTE DES RÉFÉRENCES

- 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 : Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, 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. *Advances in Water Resources*, 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. *Advances in Water Resources*, 10 (3) : 11-20.
- Choate, P. et S. Walter. (1981). *America in Ruins*. Washington : The Council of State Planning Agencies.
- Clark, R. M. et J. A. Goodrich. (1989). Developing a Data Base on Infrastructure Needs. *Journal of the American Water Works Association*, 81 (7) : 81-87.
- 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 : ASCE.
- Clark, R. M., C. L. Stafford et J. A. Goodrich. (1982). Water Distribution Systems : A Spatial and Cost Evaluation. *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, 108 (3) : 243-256.

- Cox, D. R. et D. Oakes. (1994). *Analysis of Survival Data*. London : Chapman & Hall, 201 p.
- 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) - Congrès conjoint avec la Société Canadienne de Génie Rural (SCGR)*, P. Labossière, R. Crysler et D. T. Lau (éd.), 37-43. Sherbrooke, 27-30 mai. Montréal : SCGC.
- Doleac, M. L., S. L. Lackey et G. Bratton. (1980). Prediction of Time-to-Failure for Buried Cast Iron Pipe. Dans : *Proceedings of AWWA Annual Conference - Water for the World Challenge of the 80's*. Atlanta, Juin. Denver : AWWA.
- Eisenbeis, P. (1994). *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*. Études du CEMAGREF, Série Équipements pour l'eau et l'environnement N° 17, 248 p.
- Elnaboulsi, J. et O. Alexandre. (1996). Le renouvellement des réseaux d'eau potable : une revue critique. *Canadian Water Resources Journal*, 21 (4) : 341-354.
- Fougères, D., M. Gaudreau, P. J. Hamel, C. Poitras, G. Sénécal, M. Trépanier, N. Vachon, N. et R. Veillette. (1998). *Évaluation des besoins des municipalités québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux*. Montréal : INRS-Urbanisation, Groupe de recherche sur les infrastructures et les équipements urbains (GRIEU), Rapport de recherche, 209 p. + annexes.
- 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 (éd.), 1256-1263. Long Beach, 4-6 août. New York : ASCE.

- Goulter, I. C. et A. Kazemi. (1988). Spatial and Temporal Groupings of Water Main Pipe Breakage in Winnipeg. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 15 : 91-97.
- Goulter, I. C., J. Davidson et P. Jacobs. (1993). Predicting Water-Main Breakage Rates. *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, 119 (4) : 419-436.
- Habibian, A. (1992). Developing and Utilizing Data Bases for Water Main Rehabilitation. *Journal of the American Water Works Association*, 84 (7) : 75-79.
- Habibian, A. (1994). Effect of Temperature Changes on Water-Main Breaks. *Journal of Transportation Engineering - ASCE*, 120 (2) : 312-321.
- Herz, R. K. (1996). Ageing Processes and Rehabilitation Needs of Drinking Waer Distribution Networks. *Journal Water SRT - Aqua*, 45 (5) : 221-231.
- 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*, D. S. Miller (éd.), 53-62. BHR Group Ltd. Conference Series. London : Mechanical Engineering Publications.
- Kalbfleisch, J. D. et R. L. Prentice. (1980). *The Statistical Analysis of Failure Time Data*. New York : John Wiley & Sons, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 321 p.
- 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.

- Kettler, A. J. et I. C. Goulter. (1985). An Analysis of Pipe Breakage in Urban Water Distribution Networks. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 12 : 286-293.
- Kleiner, Y. et B. Rajani. (1999). Using Limited Data to Assess Future Needs, *Journal of the American Water Works Association*, 91 (7) : 47-61.
- Kleiner, Y., B. J. Adams et J. S. Rogers. (1998a). Long-term Planning Methodology for Water Distribution System Rehabilitation. *Water Resources Research*, 34 (8), 2039-2051.
- Kleiner, Y., B. J. Adams et J. S. Rogers. (1998b). Selection and Scheduling of Rehabilitation Alternatives for Water Distribution Systems. *Water Resources Research*, 34 (8) : 2053-2061.
- Kumar, A., E. Meronkly et E. Segan. (1984). *Development of Concepts for Corrosion Assessment and Evaluation of Underground Pipelines*. U. S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, Illinois, 56 p.
- Mailhot, A., G. Pelletier, J.-F. Noël et J.-P. Villeneuve. (Soumis en 1999). Modeling the Evolution of the Structural State of Water Pipe Networks with Brief Recorded Pipe Break Histories : Methodology and Application. Soumis pour publication dans *Water Resources Research*.
- Male, J. W., T. M. Walski et A. H. Slutsky. (1990). Analyzing Water Main Replacement Policies. *Journal of Water Resources Planning and Management - ASCE*, 116 (3) : 362-374.
- 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 : ASCE.

- McDonald, S., L. Daigle et G. Félio. (1994). *Réseaux d'aqueduc et systèmes d'égouts*. Laboratoire d'infrastructures, Institut de recherche en Construction, Conseil National de Recherche du Canada, version préliminaire.
- Miller, R. G. (1981). *Survival analysis*, New York : John Wiley & Sons, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, 238 p.
- Moruzzi, L. (1984). Reasons for Pipe Damage. *Water Supply*, No. 3/4, SS16-1 à SS16-5.
- O'Day, D. K. (1982). Organizing and Analyzing Leak and Break Data for Making Main Replacement Decisions. *Journal of the American Water Works Association*, 74 (11) : 589-594.
- 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. (1986). *Water Main Evaluation for Rehabilitation/Replacement*, American Water Works Association Research Foundation (Denver, Colorado) et U.S. Environmental Protection Agency (Cincinnati, Ohio), 182 p.
- Philadelphia Water Department. (1985). Water Main Pipe Sample Physical Testing Program. Philadelphia, Pennsylvania.
- Pittman, R. A. (1994). Pipe Utility Evaluations with the Aid of GIS. Dans : *Hydraulic Engineering '94*, G. V. Cotroneo et R. R. Rumer (éds.), 242-246. Buffalo, 1-5 août. New York : ASCE.

- Press, W. H., B. P. Flannery, S. A. Teukolsky et W. T. Vetterling. (1988). *Numerical Recipes in C*. Cambridge : Cambridge University Press, 735 p.
- Scherer, P. et T. Phebey. (1995). Geographical Information Systems. *Aqua*, 44 (3) : 118-124.
- Schock, M. R. (1990). Internal Corrosion and Deposition Control. Dans : *Water Quality and Treatment - A Handbook of Community Water Supplies - Fourth Edition*. Frederick W. Pontius (AWWA- éd.), Chap. 17, 997-1111. New York : McGraw-Hill, Inc.
- Shamir, U. et C. Howard. (1979). Analytic Approach to Scheduling Pipe Replacement. *Journal of the American Water Works Association*, 71 (5) : 248-258.
- Sharp, W. W. et T. M. Walski. (1988). Predicting Internal Roughness in Water Mains. *Journal of the American Water Works Association*, 80 : 34-40.
- Siddiqui, S. et S. Mirza. (1996). Canadian Municipal Infrastructure - The Present State. Dans : *Conférence annuelle de la société Canadienne de Génie Civil (SCGC) - 1^{ière} conférence spécialisée sur les transports*, 519-530. Edmonton, 29 mai au 1^{er} juin. Montréal : SCGC.
- Sullivan, J. P. Jr. (1982). Maintaining Aging Systems - Boston 's Approach. *Journal of the American Water Works Association*, 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 (éd.), 1218-1224. Long Beach, 4-6 août. New York : ASCE.
- Walski, T. M. et A. Pelliccia. (1982). Economic Analysis of Water Main Breaks. *Journal of the American Water Works Association*, 74 (3) : 140-147.