

**MODÉLISATION DES BRIS
D'AQUEDUC ET ANALYSE DES
RÉSULTATS POUR LA VILLE DE
GATINEAU (SECTEUR DE
GATINEAU)**

Rapport de recherche N° 1280

Mars 2012

MODÉLISATION DES BRIS D'AQUEDUC ET ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LA VILLE DE GATINEAU (SECTEUR DE GATINEAU)

Sophie Duchesne
Jean-Pierre Villeneuve
Babacar Toumbou
Amélie Thériault
Guillaume Beardsell
Nabila Bouzida

Centre Eau Terre et Environnement
Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-ETE)
490, rue de la Couronne
Québec (QC) G1K 9A9

Rapport N° 1280

Mars 2012

INRS
Université d'avant-garde

Canada 

Québec 

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport remercient les gouvernements du Québec et du Canada pour leur appui financier à ce projet dans le cadre du Fonds sur l'infrastructure municipale rurale (FIMR), volet 2, qui est géré par le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). Ils remercient également la Ville de Québec pour son appui financier. Ce rapport a été réalisé dans le but de prédire l'évolution des bris du réseau d'aqueduc du secteur de Gatineau (ville de Gatineau) et de tester l'impact de divers scénarios de remplacement sur le nombre de bris annuel dans ce secteur.

Les auteurs souhaitent remercier la grande collaboration des gens de la Ville de Gatineau, qui ont fourni des données essentielles pour la réalisation de cette étude, ainsi que celle des gens des villes de Québec, Saguenay et St-Georges, qui ont également fourni des données pour le développement et la validation du modèle utilisé à Gatineau.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
SOMMAIRE	XI
1. INTRODUCTION	1
2. PRÉDICTION DE L'ÉVOLUTION DES BRIS DE CONDUITES D'AQUEDUC DE LA VILLE DE GATINEAU (SECTEUR DE GATINEAU)	3
2.1 Modélisation du nombre de bris	3
2.1.1 Rappel théorique	3
2.1.2 Calage du modèle	4
2.1.3 Intervalle de confiance	6
2.1.4 Simulation de scénarios de remplacement	8
2.1.5 Impact du type de remplacement sur le nombre de bris	11
2.2 Modélisation du taux de bris	12
2.2.1 Description du modèle	12
2.2.2 Calage du modèle	13
2.3 Modélisation de la longueur de conduites atteignant le taux de bris critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans	17
2.3.1 Évaluation du taux de remplacement sur le réseau théorique	18
2.4 Taux de remplacement souhaitables pour la ville de Gatineau, secteur de Gatineau	20
2.5 Estimation des coûts	21
2.5.1 Coûts de remplacement	22
2.5.2 Coûts de réparation des bris	24
2.5.3 Coûts totaux	24
2.6 Conclusion	25
3. CRÉATION DE LA BASE DE DONNÉES DES BRIS D'AQUEDUC DE LA VILLE DE GATINEAU, SECTEUR DE GATINEAU	29
3.1 Données initiales fournies par la Ville	29
3.2 Étapes suivies pour la mise en forme de la base de bris	33
3.2.1 Modification de l'orthographe de l'adresse du bris	33
3.3 Exemple de modification des noms de rue sur le fichier de bris initial	34
3.4 Affectation des coordonnées géographiques aux bris	37
3.5 Localisation des bris sur les intersections de rues et sur des repères	38
3.6 Jointure des bris aux conduites d'aqueduc	40

4.	ESTIMATION DES REMPLACEMENTS DE CONDUITES DU SECTEUR DE GATINEAU	45
4.1	Préambule	45
4.2	Problématique	45
4.3	Étapes suivies	46
4.3.1	Carte des années d'installation des tronçons	46
4.3.2	Carte des matériaux	46
4.4	Identification des conduites remplacées	47
4.4.1	Identification des conduites remplacées à partir des dates de bris	47
4.4.2	Identification des conduites remplacées par analyse des années d'installation par secteur	48
4.5	Résultats	50
4.5.1	Analyse visuelle des résultats	50
4.5.2	Analyse statistique des résultats	51
5.	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	55
6.	ANNEXES	57
6.1	Tableaux des bris simulés avec différents scénarios de remplacement	59
6.1.1	152	66
6.2	Fichiers joints à ce rapport	67
6.2.1	Excel	67
6.2.2	ArcGIS	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Résultat de la simulation des bris cumulés.	5
Figure 2 : Résultat de la simulation (modèle <i>EEES</i>) comparé avec les observations.	6
Figure 3 : Courbes de l'intervalle de confiance pour le nombre de bris simulé.	7
Figure 4 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur l'âge.	9
Figure 5 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur le nombre de bris.	10
Figure 6 : Comparaison de deux scénarios de remplacement.	11
Figure 7 : Taux de bris moyen observé en fonction de l'âge.	13
Figure 8 : Taux de bris moyen simulé en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.	14
Figure 9 : Nombre de bris simulé avec le modèle de taux de bris en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.	15
Figure 10 : Nombre de bris simulé par les modèles <i>EEES</i> et <i>TB</i> et comparaison avec les observations.	16
Figure 11 : Comparaison entre les résultats du modèle <i>EEES</i> global et les bris du réseau théorique.	18
Figure 12 : Taux annuel de remplacement estimé de 1996 à 2006.	21
Figure 13 : Coûts annuels pour 0,5 % de remplacement.	23
Figure 14 : Nombre de bris répertoriés de 1990 à 2008 selon la base commençant en 1990...	30
Figure 15 : Nombre de bris répertoriés de 1981 à 2006 (base « Bris81 »).	31
Figure 16. Localisation des bris ayant des numéros civiques avec les (X, Y) de ces derniers.	37
Figure 17 : Localisation d'un bris ayant un magasin comme repère (Google® Map et ArcGIS).	38
Figure 18 : Exemple d'informations disponibles lors de la jointure d'un bris à une conduite.	41
Figure 19 : Nombre de bris enregistrés à Gatineau de 1981 à 2006, par carreau de 500 m par 500 m.	43
Figure 20 : Exemple d'une conduite répertoriée par l'INRS comme ayant été remplacée (et non installée) en 2001, étant donné que plusieurs bris y sont survenus entre 1995 et 1999.	44
Figure 21 : Années d'installation des tronçons.	46
Figure 22 : Répartition des matériaux.	47

Figure 23 : Affichage dans ArcGIS des conduites possiblement remplacées.	49
Figure 24 : Conduites remplacées du secteur de Gatineau (en bleu).	51
Figure 25 : Linéaire de réseau cumulé.	52
Figure 26 : Pourcentage du linéaire de réseau remplacé par année (m/m).	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Intervalle de confiance à 95 % pour le nombre de bris simulé.....	7
Tableau 2 : Nombre de bris simulé pour les scénarios basés sur l'âge.....	9
Tableau 3 : Nombre de bris simulé pour le scénario basé sur le nombre de bris.....	10
Tableau 4 : Nombre de bris simulé de 1981 à 2029.....	16
Tableau 5. Longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an, selon l'historique théorique des bris, si toutes les conduites atteignant le taux critique sont remplacées à chaque année.....	19
Tableau 6 : Coûts par mètre de conduite en fonction du diamètre.....	22
Tableau 7: Coûts de remplacement annuels moyens de 2009 à 2029 (en dollars canadiens) en fonction du taux de remplacement.....	24
Tableau 8 : Exemples de données fournies dans le fichier original.....	32
Tableau 9 : Nombre de bris en fonction du type de localisation utilisé.....	32
Tableau 10 : Exemple de données fournies dans le fichier 'NuméroCivique.xls'.....	33
Tableau 11 : Exemples de modifications apportées sur les noms de rues.....	34
Tableau 12 : Exemples de changements aux noms de rues de la nouvelle Ville de Gatineau.....	35
Tableau 13 : Localisation des bris ayant comme information un coin de rue ou un repère.....	38
Tableau 14 : Récapitulatif des bris que nous avons pu localiser ou non avec des coordonnées géographiques.....	40
Tableau 15 : Exemple de jointure des bris aux conduites les plus proches, sur la même rue...	41
Tableau 16 : Informations disponibles dans le fichier « AQUGatineauBrisées1981_2006 ».	42
Tableau 17 : Exemple du doublement d'une conduite.....	50
Tableau 18 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 0 % de remplacement.....	60
Tableau 19 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 0,5 % de remplacement.....	61
Tableau 20 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 1 % de remplacement.....	62
Tableau 21 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 1,5 % de remplacement.....	63
Tableau 22 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 2 % de remplacement.....	64
Tableau 23 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 2,5 % de remplacement.....	65
Tableau 24 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 3 % de remplacement.....	66

SOMMAIRE

Ce rapport présente les résultats récemment obtenus par les chercheurs de l'INRS-ETE concernant l'évaluation et la prédiction de l'état structural des conduites d'eau potable de la Ville de Gatineau, secteur Gatineau. Toutes les analyses présentées se basent sur les données fournies par la Ville, soit : 1) la base de données des conduites d'aqueduc, présentant un portrait à jour du réseau en 2009; et 2) une table des fuites répertoriées sur le réseau de 1981 à 2004. Ces bases de données ont été remaniées, avec le support du personnel de la Ville, tel que décrit au chapitre 4 de ce rapport.

À partir des données fournies par la Ville, deux modèles distincts ont été développés pour prédire l'évolution future de l'état du réseau et, par la suite, pour estimer l'impact de divers scénarios de remplacement. Ces travaux sont présentés en détails au chapitre 2 de ce rapport.

Le premier modèle est basé sur les principes de l'analyse de survie et donne l'évolution du nombre total de bris sur le réseau, en tenant compte du vieillissement de chacune des conduites. Pour ce modèle, des analyses antérieures (réalisées sur des données d'une autre municipalité) ont démontré que la prise en compte du diamètre et de la longueur des conduites avait peu d'impacts sur le nombre de bris total simulé à chaque année sur le réseau; seul l'âge des conduites a donc été retenu comme variable pour modéliser le nombre annuel de bris. Le deuxième modèle est un modèle de taux de bris, qui tient compte à la fois de l'âge des conduites, mais également de leur longueur pour prédire le nombre annuel de bris sur le réseau. Des analyses comparatives montrent que ces deux modèles donnent des résultats comparables sur l'horizon 2009 à 2029. Ainsi, on prévoit que si aucune conduite n'était remplacée ni ajoutée sur le réseau d'ici 2029, le nombre de bris annuel total sur le réseau passerait de 166 en 2009 à 263 en 2029. Le modèle de survie des conduites a été appliqué pour déterminer le taux de remplacement annuel qu'il faudrait mettre en place afin de maintenir constant le nombre annuel de bris après 2009. Selon les analyses effectuées, et dépendamment du scénario de remplacement, il faudrait remplacer entre 1,5 % et 2 % des conduites, à chaque année, pour stabiliser le nombre annuel de bris et ce, en faisant l'hypothèse qu'aucune nouvelle conduite ne sera ajoutée au réseau après 2009 (à l'exception de celles, bien sûr, qui prendront la place de conduites existantes).

Suite à une information qui nous a été transmise par le MAMROT en janvier 2011, nous avons également analysé la longueur de conduites qui atteindrait le taux critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans. Selon le MAMROT, c'est en effet ce critère qui est le plus souvent retenu au Québec pour déterminer si une conduite d'aqueduc doit être remplacée ou non. À l'aide du modèle de prédiction des bris élaboré précédemment, nous avons construit un historique théorique de bris jusqu'en 2029. À partir de cet historique théorique, nous avons évalué que, si on remplace à chaque année la longueur de conduites qui atteint le taux de bris critique de 3 bris/km/an, il faudrait remplacer 2,2 % du réseau la première année, afin de rattraper le retard accumulé au cours des années précédentes, puis par la suite appliquer un taux de remplacement de 0,5 % par année en moyenne (au cours des 19 années suivantes). Ce taux moyen de remplacement est un taux minimal et ne pourrait être obtenu que si l'on remplace réellement, à chaque année, toutes les conduites qui atteignent 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans). Il faut toutefois noter que ce pourcentage de remplacement conduirait à une augmentation du nombre de bris total sur le réseau. Ainsi, si ce scénario de remplacement était retenu, il faudrait prévoir les ressources nécessaires pour faire face à l'augmentation du nombre annuel total de bris sur le réseau. Selon une évaluation sommaire des coûts, présentée au chapitre 2 de ce rapport, le coût total sur 20 ans de ce scénario est de 71 millions de dollars, soit 32 M \$ pour les remplacements de conduites et 39 M \$ pour les réparations de bris. Quant au scénario qui permet de stabiliser le nombre annuel de bris, qui correspond à un taux de remplacement annuel de 1,5 %, son coût total estimé sur 20 ans est de 119 millions de dollars, soit 85 M \$ pour les remplacements et 34 M \$ pour les réparations de bris. Ainsi, sur la base de ces estimations, on constate qu'il serait plus avantageux, d'un point de vue économique, de ne remplacer à chaque année que les conduites qui atteignent le taux critique de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans), même si ce scénario conduit à une augmentation de 34 % du nombre annuel de bris sur 20 ans.

1. Introduction

En 1996, l'équipe du professeur Jean-Pierre Villeneuve, du centre ETE de l'INRS, a réalisé un projet de recherche portant sur l'évaluation des besoins des municipalités québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux. Dans le cadre de cette étude, des données avaient été fournies par cinq différentes villes du Québec, à savoir Saguenay (Chicoutimi et Jonquière), Gatineau, Laval et St-Georges. À partir de ces données, un modèle de survie permettant de prédire l'évolution du nombre de bris des conduites d'aqueduc de chacune de ces villes avait été mis en place. C'est dans la continuité de cette étude que les données de la ville de Gatineau (secteur de Gatineau) sont analysées dans ce rapport.

Le chapitre suivant de ce rapport (Chapitre 2) est dédié au développement et à l'application de modèles pour prédire l'évolution future de l'état des conduites d'aqueduc de Gatineau (secteur de Gatineau). Le chapitre 3 concerne la création de la base de données des bris des conduites d'aqueduc de Gatineau survenus entre les années 1981 et 2004, qui a été utilisée pour construire les différents modèles de prédiction. Quant au chapitre 4, il résume les étapes suivies pour l'estimation des conduites d'aqueduc remplacées à Gatineau, étant donné qu'aucune information concernant le remplacement n'est disponible dans la base de données reçue de la ville. À la fin du rapport seront présentées différentes annexes contenant des résultats additionnels de simulation ainsi que des détails concernant les fichiers joints à ce document.

2. Prédiction de l'évolution des bris de conduites d'aqueduc de la ville de Gatineau (secteur de Gatineau)

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre, à la section 2.1, les résultats de l'application d'un modèle prédisant l'évolution des bris sur le réseau d'aqueduc de Gatineau. Appliqué de façon globale sur un réseau entier, ce modèle donne le nombre total de bris sur le réseau à chaque année et permet de tester l'impact de divers scénarios de remplacement. Un autre modèle fournissant le même type d'information est développé puis appliqué au réseau de Gatineau à la section 2.2; ce modèle se base sur le calcul d'un taux de bris par unité de longueur. À la section 2.3, la modélisation de la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans) est présentée, puis le pourcentage de la longueur du réseau atteignant ce taux de bris critique est estimé. Enfin, les taux de remplacement souhaitables pour le réseau d'aqueduc de Gatineau sont résumés à la section 2.4 puis les coûts associés à ces scénarios de remplacement sont estimés à la section 2.5.

2.1 Modélisation du nombre de bris

2.1.1 Rappel théorique

Le modèle mathématique utilisé dans le cadre de cette étude pour la prédiction du nombre annuel de bris est différent de celui utilisé en 1996 (Villeneuve *et al.*, 1998), dans le cadre des travaux effectués pour le Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT, MAM à l'époque). Le modèle utilisé en 1996 est un modèle dont le premier bris était modélisé par une distribution de Weibull et les bris subséquents par une distribution exponentielle, d'où l'appellation de modèle « Weibull-Exponentiel (W-E) ». Ce modèle est décrit en détails dans Pelletier (2000) et Mailhot *et al.* (2000).

Dans le cadre du projet actuel, plusieurs autres modèles ont été développés puis, après de nombreuses études comparatives, le modèle choisi est celui selon lequel le temps d'arrivée du premier bris est modélisé par une distribution exponentielle, le temps du deuxième bris par une autre distribution exponentielle et celui des bris subséquents par une troisième distribution

exponentielle, d'où l'appellation « modèle Exponentiel-Exponentiel-Exponentiel (EEE) ». Puisque ce modèle est basé sur une fonction de survie (S) qui ne dépend que du temps (t), nous désignerons par la suite ce modèle par modèle *EEEST*.

Il peut être démontré que, selon le modèle *EEEST*, le nombre moyen de bris cumulés pour un tronçon donné entre sa date d'installation et une année d'observation donnée T_a est donné par :

$$\mu(T_a) = \left(\frac{\kappa_3}{\kappa_2} - 1 \right) \left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2 - \kappa_1} \right) \left(-e^{-\kappa_2 T_a} - e^{-\kappa_1 T_a} \right) + \kappa_3 T_a + \left(\frac{\kappa_3}{\kappa_2} + \frac{\kappa_3}{\kappa_1} - 2 \right) \left(e^{-\kappa_1 T_a} - 1 \right) \quad (1)$$

où $\mu(T_a)$ est le nombre de bris moyen cumulé entre la date d'installation du tronçon et l'année d'observation T_a et où κ_1 , κ_2 et κ_3 sont les paramètres du modèle, dont les valeurs doivent être préalablement déterminées à partir des bris observés; c'est ce qu'on appelle l'étape du calage.

Le nombre de bris cumulé pour l'ensemble des tronçons de conduites d'un réseau peut ensuite être calculé pour une année donnée A grâce à l'équation suivante :

$$\bar{n}(A) = \sum_{i=1}^{n_t} \mu_i(T_a) \quad (2)$$

où n_t est le nombre total de tronçons de conduites dans le réseau.

Dans ce travail, la méthode des moindres carrés a été appliquée pour déterminer les valeurs des paramètres κ_1 , κ_2 et κ_3 à partir des données de bris observées. Cette méthode et ses résultats sont présentés aux sections suivantes.

2.1.2 Calage du modèle

La somme des écarts au carré entre le nombre de bris simulés par année et le nombre de bris observés par année a été minimisée. Il s'agit donc de calculer l'expression suivante :

$$\min_{\{p \geq 0\}} \left\{ f(p) = \sum_{i=1}^{nbannée} \left[\bar{n}(A_i) - nbobs_i \right]^2 \right\} \quad (3)$$

où $p = (\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3)$ et où $p \geq 0$ signifie que toutes les composantes de p doivent demeurer positives. Dans cette équation, les A_i sont les années d'observation, alors que $\bar{n}(A_i)$ et $nbobs_i$ représentent respectivement le nombre total de bris cumulé simulé et le nombre total de bris cumulé observé à l'année A_i . Pour le calage, les bris survenus sur les conduites du secteur de Gatineau au cours des années 1981 à 2004 ont été utilisés.

En évaluant l'expression donnée par l'équation 3, on obtient les paramètres κ_1 , κ_2 et κ_3 qui seront utilisés pour le modèle de simulation du nombre moyen annuel de bris. Pour le secteur de Gatineau, ces valeurs sont $\kappa_1 = 0,0108$; $\kappa_2 = 0,16583$; et $\kappa_3 = 0,19992$.

Le nombre annuel de bris a été simulé avec ces paramètres. Les courbes représentant respectivement les bris moyens cumulés simulés et ceux observés cumulés, en fonction des années (de 1981 à 2004), sont illustrées à la Figure 1. Cette figure reflète bien la capacité du modèle à représenter l'évolution du nombre de bris cumulé en fonction du temps. L'évolution des bris annuels sur le réseau en fonction du temps, toujours sur la base des paramètres obtenus par calage, est représentée à la Figure 2, où sont aussi donnés, à titre de comparaison, les bris observés (points rouges).

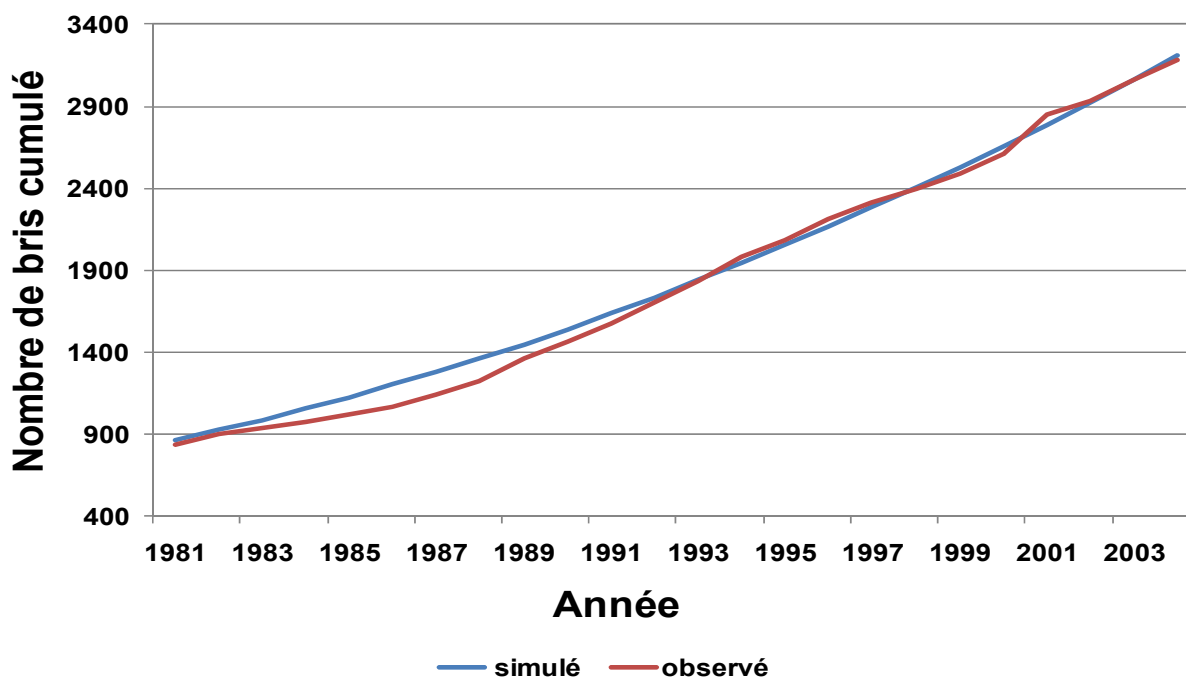


Figure 1 : Résultat de la simulation des bris cumulés.

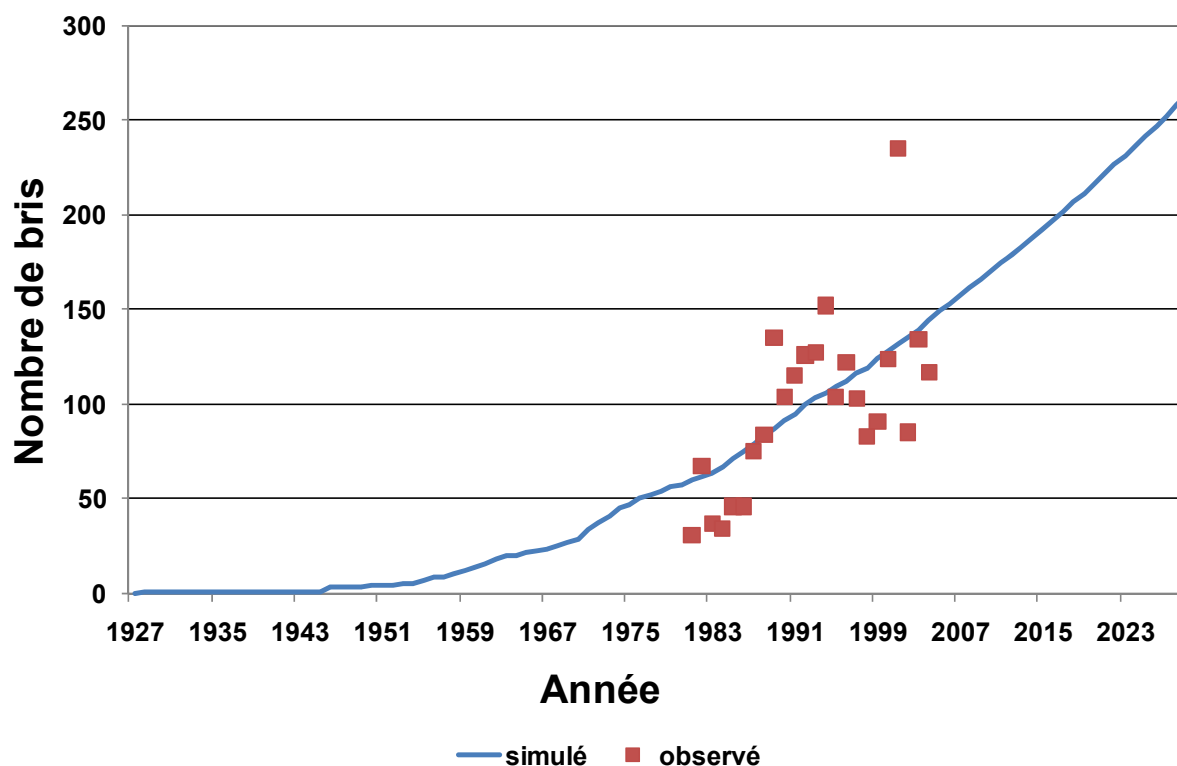


Figure 2 : Résultat de la simulation (modèle EEEST) comparé avec les observations.

Encore là, on peut constater, malgré la dispersion des valeurs observées, la capacité du modèle à bien simuler les bris observés.

2.1.3 Intervalle de confiance

L'ajustement d'un modèle de prédiction de bris avec un nombre restreint de données induit un certain niveau d'incertitude quant aux prédictions réalisées à l'aide de ce modèle. Afin de définir la plage d'incertitude autour de notre courbe simulée, une méthode par ré-échantillonnage (*bootstrap*) (Efron, 1979) a été appliquée. À partir de cette méthode, la plage correspondant à un intervalle de confiance de 95 % a été définie. Ceci signifie qu'il y a 95 % de chance que les valeurs prédites se situent à l'intérieur de cette plage. On retrouve, à la Figure 3, les courbes représentant cet intervalle de confiance. On donne aussi au Tableau 1 quelques valeurs représentant cet intervalle. On constate au Tableau 1, à titre d'exemple, que pour l'année 2029 les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % des prévisions du modèle sont de 228 et 298 respectivement, alors que la moyenne est de 263.

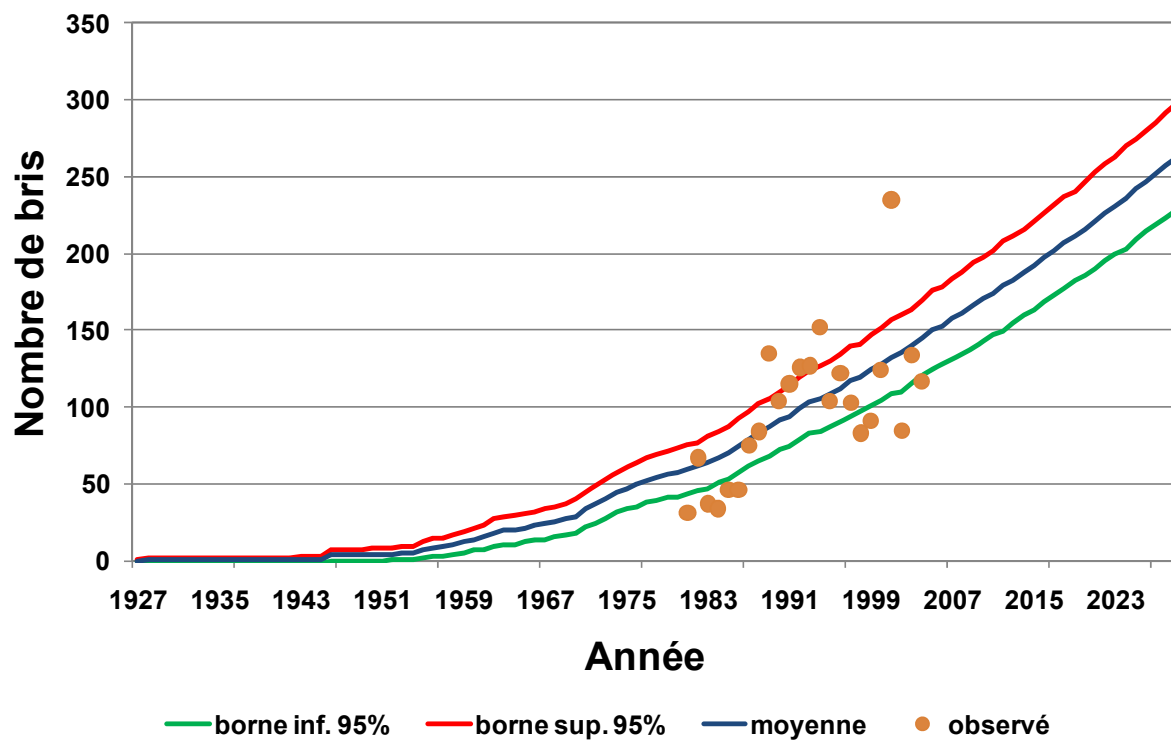


Figure 3 : Courbes de l'intervalle de confiance pour le nombre de bris simulé.

Tableau 1 : Intervalle de confiance à 95 % pour le nombre de bris simulé.

Année	Nombre de bris					
	1981	1991	2001	2011	2021	2029
Borne inférieure	44	74	109	147	190	228
Moyenne	60	94	133	174	221	263
Borne supérieure	76	114	157	202	253	298

2.1.4 Simulation de scénarios de remplacement

Afin d'évaluer l'impact du taux de remplacement sur le nombre de bris annuel, deux méthodes de remplacement ont été utilisées comme scénarios. La première méthode consiste à effectuer le remplacement en tenant compte de l'âge des conduites : on remplace en partant des conduites les plus vieilles vers les plus récentes. La deuxième méthode est basée sur le nombre de bris : on remplace, dans l'ordre, en partant des conduites ayant le plus grand nombre de bris vers celles qui en ont le moins.

Pour la modélisation, les mêmes paramètres que ceux obtenus avec la méthode des moindres carrés (voir section 2.1.2) sont utilisés pour évaluer l'impact des deux types de scénarios de remplacement.

2.1.4.1 Scénarios basés sur l'âge des conduites

Six scénarios de remplacement sont simulés. Ces scénarios représentent respectivement des pourcentages de remplacement de 0,5 %, de 1 %, de 1,5 %, de 2 %, de 2,5 % et de 3 % de la longueur totale du réseau en 2009. Le scénario de base étant celui donné à la Figure 2 (aucun remplacement). Les résultats de ces simulations sont présentés à la Figure 4 et au Tableau 2.

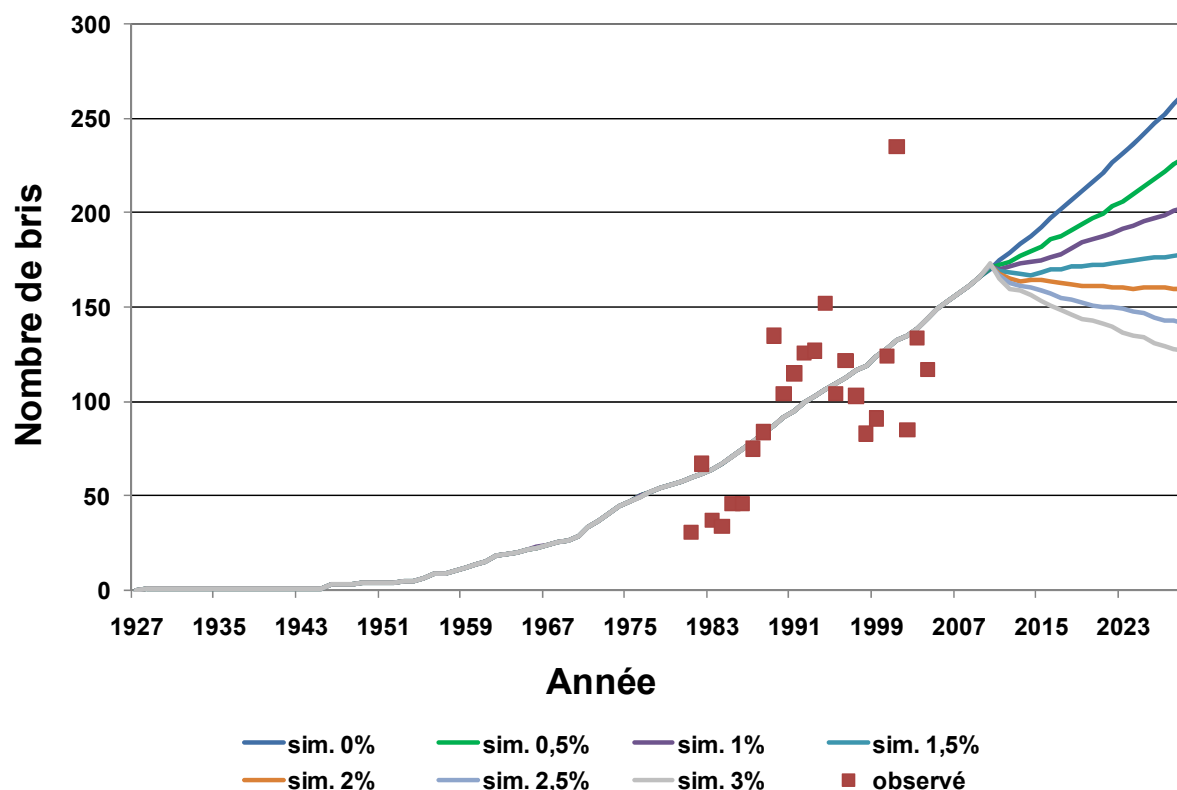


Figure 4 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur l'âge.

Tableau 2 : Nombre de bris simulé pour les scénarios basés sur l'âge.

Taux \ Année	0 %	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %	2,5 %	3 %
2009	166	166	166	166	166	166	166
2019	211	194	184	172	162	153	144
2029	263	229	203	178	160	141	127

2.1.4.2 Scénarios basés sur le nombre de bris

Dans ce type de scénario, on remplace d'abord les conduites qui ont eu le plus grand nombre de bris. Comme précédemment, six scénarios de remplacement sont simulés. Ces scénarios représentent respectivement des pourcentages de remplacement de 0,5 %, de 1 %, de 1,5 %, de 2 %, de 2,5 % et de 3 %.

de 2 %, de 2,5 % et de 3 % de la longueur totale du réseau en 2009. Les résultats obtenus pour ces scénarios sont donnés à la Figure 5 et au Tableau 3.

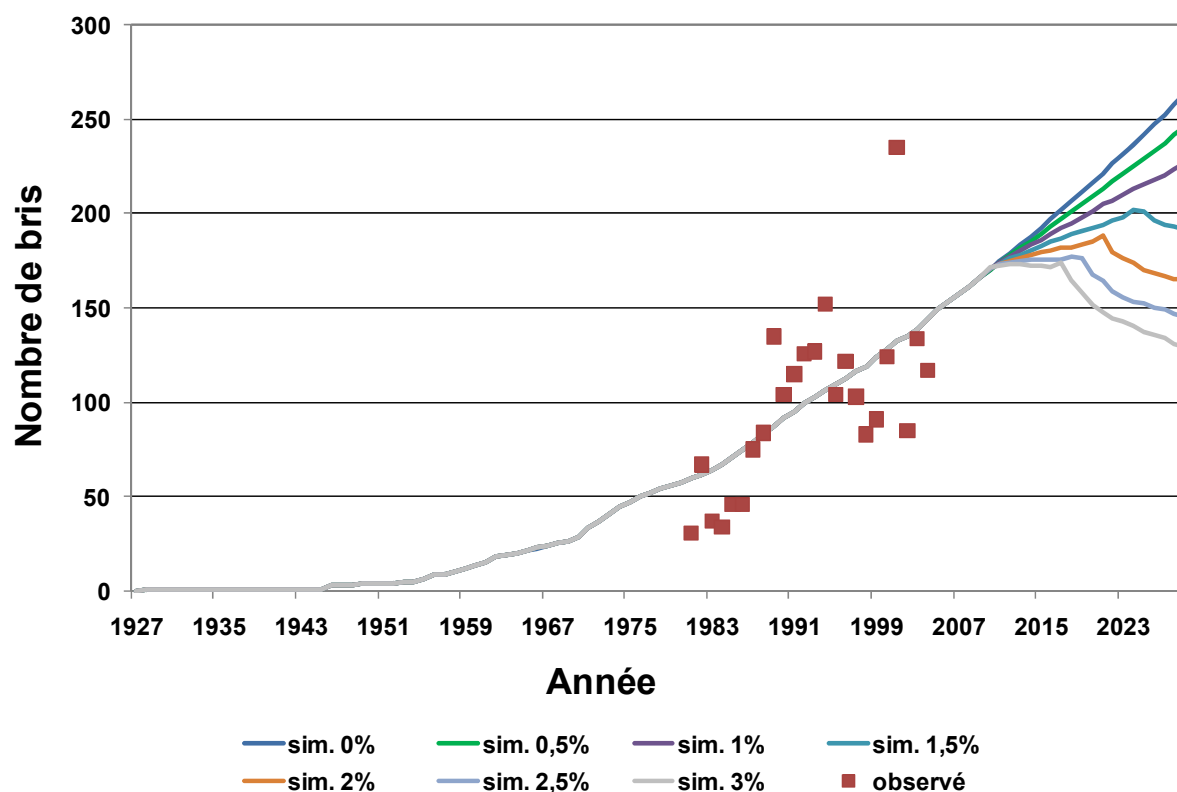


Figure 5 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur le nombre de bris.

Tableau 3 : Nombre de bris simulé pour le scénario basé sur le nombre de bris.

Taux \ Année	0 %	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %	2,5 %	3 %
2009	166	166	166	166	166	166	166
2019	211	205	198	191	183	177	158
2029	263	246	227	192	165	145	129

2.1.5 Impact du type de remplacement sur le nombre de bris

On pourrait penser *a priori* que remplacer en premier les conduites qui ont le plus grand nombre de bris constituerait une stratégie gagnante. On se doit cependant de noter que la stratégie la plus payante à court terme pour réduire le nombre total de bris, d'après les résultats du modèle, doit être basée sur l'âge des conduites, tel qu'on peut le remarquer, par exemple, à la Figure 6. Cette figure donne le nombre annuel de bris prédit pour deux scénarios de remplacement distincts, soit un scénario de remplacement annuel de 1,5 %, pour lequel les conduites les plus vieilles sont remplacées en premier et un scénario de remplacement annuel de 2 %, pour lequel les conduites avec le plus grand nombre de bris sont remplacées en premier.

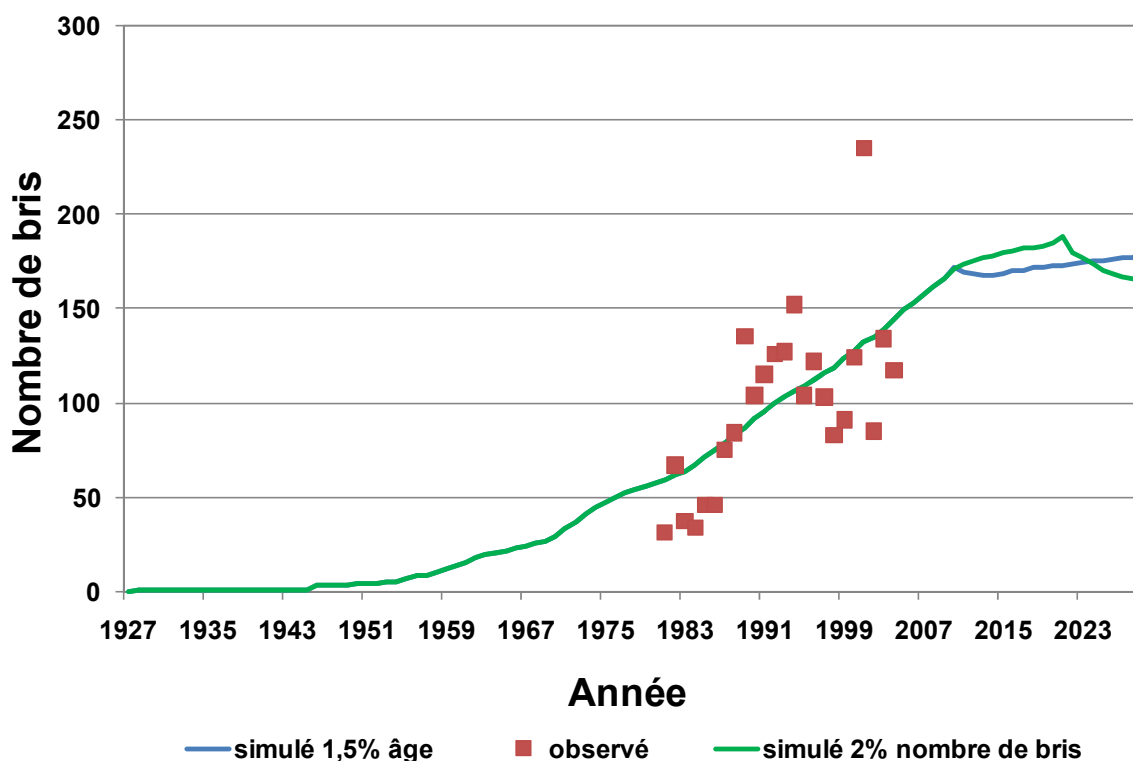


Figure 6 : Comparaison de deux scénarios de remplacement.

Ces observations sont cependant basées sur les seuls résultats du modèle, qui ne tient compte que de l'âge d'une conduite pour simuler le nombre de bris qui surviendra sur celle-ci. Ainsi, dans le modèle, seul l'âge d'une conduite détermine le taux de bris de cette conduite, et non le nombre de bris observés sur cette même conduite par le passé.

2.2 Modélisation du taux de bris

2.2.1 Description du modèle

Dans la modélisation précédente, le nombre de bris par conduite a été simulé et ce, sans tenir compte de la longueur de ces conduites. Afin de comparer les résultats de cette modélisation avec ceux que l'on obtiendrait en tenant compte de la longueur des conduites, un modèle de prédiction des taux de bris a été développé. Pour pouvoir réaliser cette analyse, la base de données originale a d'abord été restructurée. Cette nouvelle base de données a été constituée à partir des bris des conduites en fonction de leur âge et de leur longueur. Par exemple, si on a sur notre réseau 10 conduites qui ont eu 10 ans pendant la période d'observation, qui ont eu un total de 4 bris pendant leur dixième année de vie et dont la longueur cumulée est de 800 m : le taux de bris moyen pour ces 10 conduites de 10 ans sera alors de 5 bris par 1 000 m par an. Le résultat de cette restructuration donne la Figure 7, où on retrouve le taux de bris moyen observé en fonction de l'âge des conduites pour le secteur de Gatineau. On observe sur cette figure que les taux de bris pour les conduites d'environ 50 ans et plus semblent peu élevés. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les conduites qui étaient les plus susceptibles de briser ont probablement été remplacées avant ou au cours de la période d'observations. Celles qui restent en place sont donc celles qui sont le moins susceptibles de briser et c'est pourquoi le taux de bris observé pour ces conduites est plus faible.

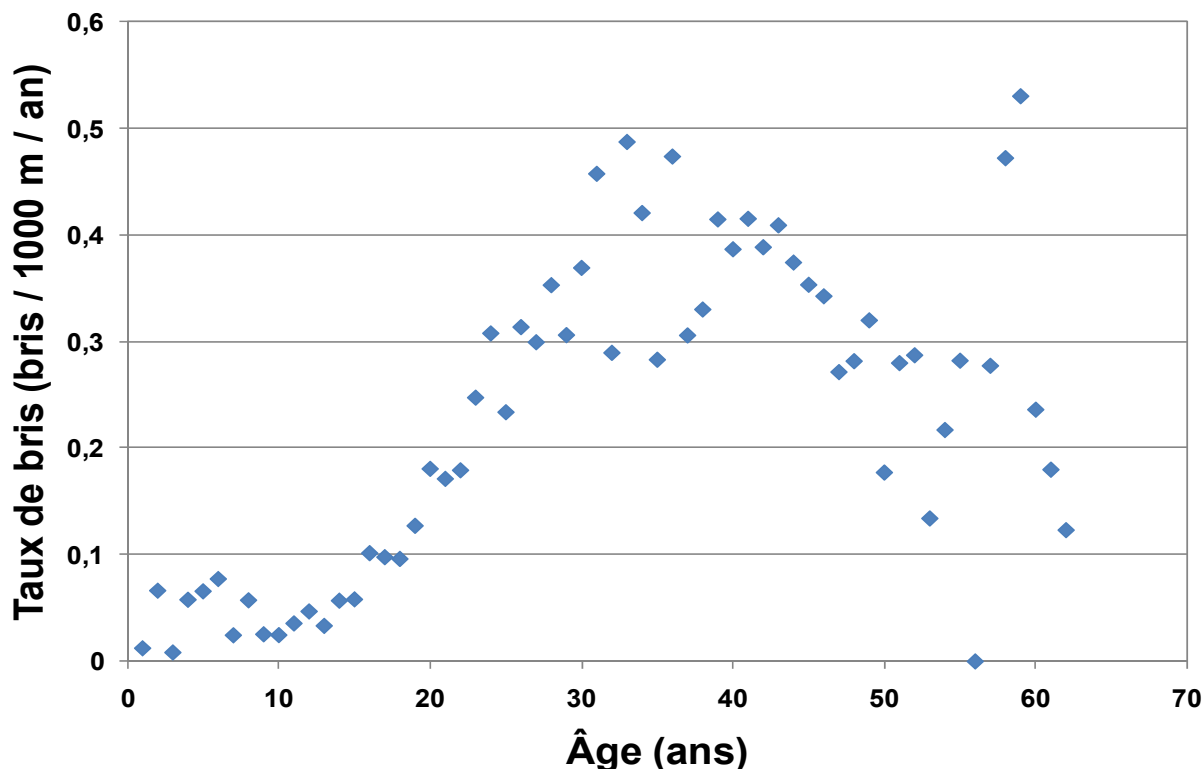


Figure 7 : Taux de bris moyen observé en fonction de l'âge.

Alors que le modèle *EEEST*, présenté précédemment, est un modèle probabiliste qui prédit le temps d'arrivée des bris sur une conduite en fonction de son âge, le modèle des taux de bris est une régression qui représente au mieux les données classées par âge (c.-à-d. telles que représentées à la Figure 7). Le modèle *TB* suivant a été utilisé pour modéliser le taux de bris :

$$TB(t) = -A + \frac{B}{C - e^{D \cdot t}} \quad (4)$$

où *TB* est le taux de bris pour un âge *t* donné, et où *A*, *B*, *C* et *D* sont les paramètres de calage du modèle.

2.2.2 Calage du modèle

Les données de taux de bris illustrées la Figure 7 ont servi au calage du modèle, avec la méthode des moindres carrés. Les quatre paramètres (*A*, *B*, *C* et *D*) ainsi obtenus (*A* = 0,39678; *B* = 2419,49; *C* = -6892,12; et *D* = 0,38837) sont ceux qui seront utilisés pour les simulations.

La Figure 8 donne les résultats de la simulation du taux de bris en fonction de l'âge avec le modèle *TB*. Notons que, même si les taux de bris pour les conduites d'environ 50 ans et plus semblent peu élevés, l'information concernant ces conduites a tout de même été conservée pour le calage du modèle. De cette façon, on obtient une stabilisation du taux de bris pour des âges plus élevés.

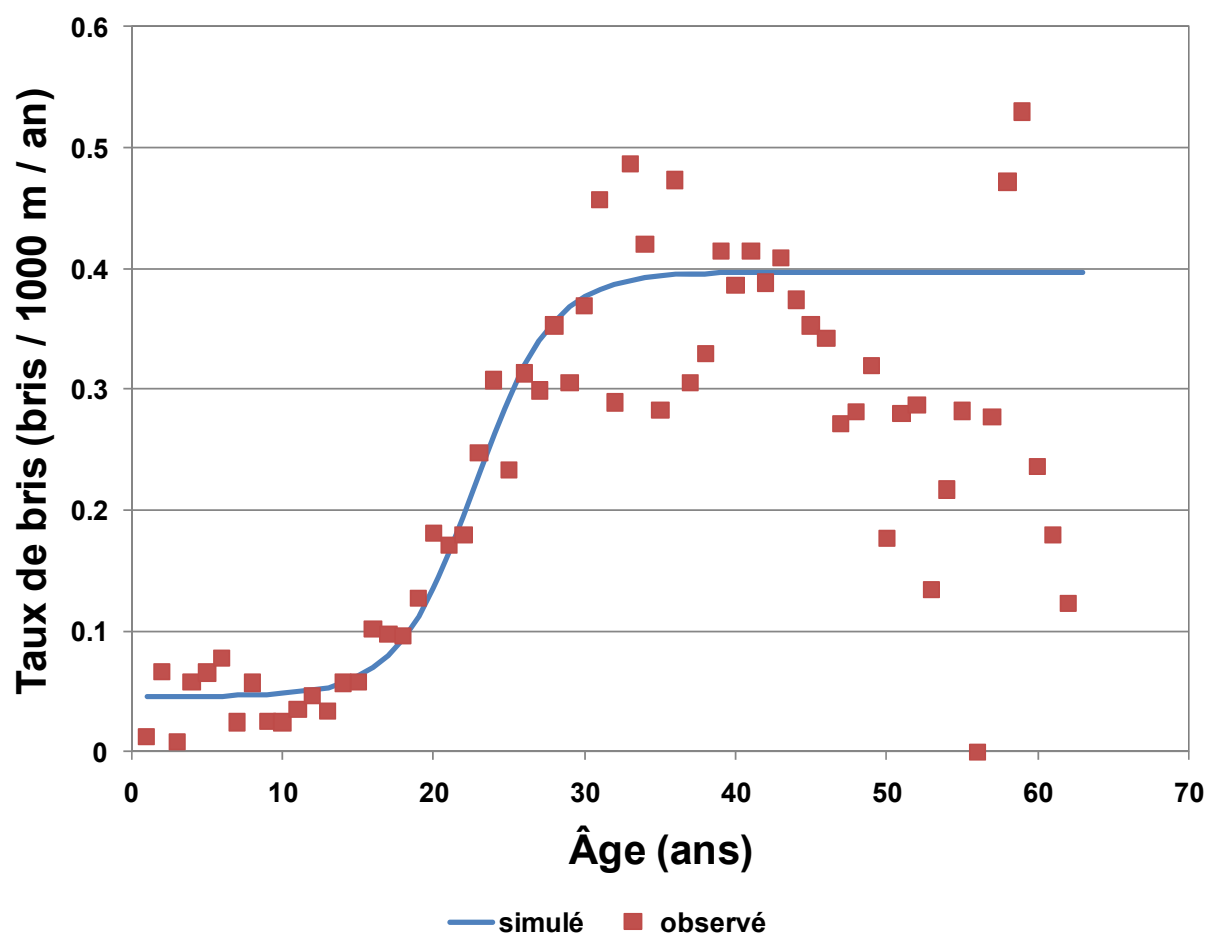


Figure 8 : Taux de bris moyen simulé en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.

Afin de comparer les résultats du modèle *EEEst* et ceux du modèle *TB*, il est nécessaire de reconstituer le nombre de bris moyen à partir du taux de bris. Pour ce faire, pour chaque conduite et pour chaque année de simulation, le taux de bris donné par le modèle *TB* est multiplié par la longueur de la conduite; ceci donne un nombre de bris moyen simulé pour chaque conduite. On en déduit la courbe donnée par la Figure 9, qui montre la simulation du

nombre de bris à chaque année en utilisant le modèle *TB* (avec $A = 0,39678$; $B = 2419,49$; $C = -6892,12$; et $D = 0,38837$).

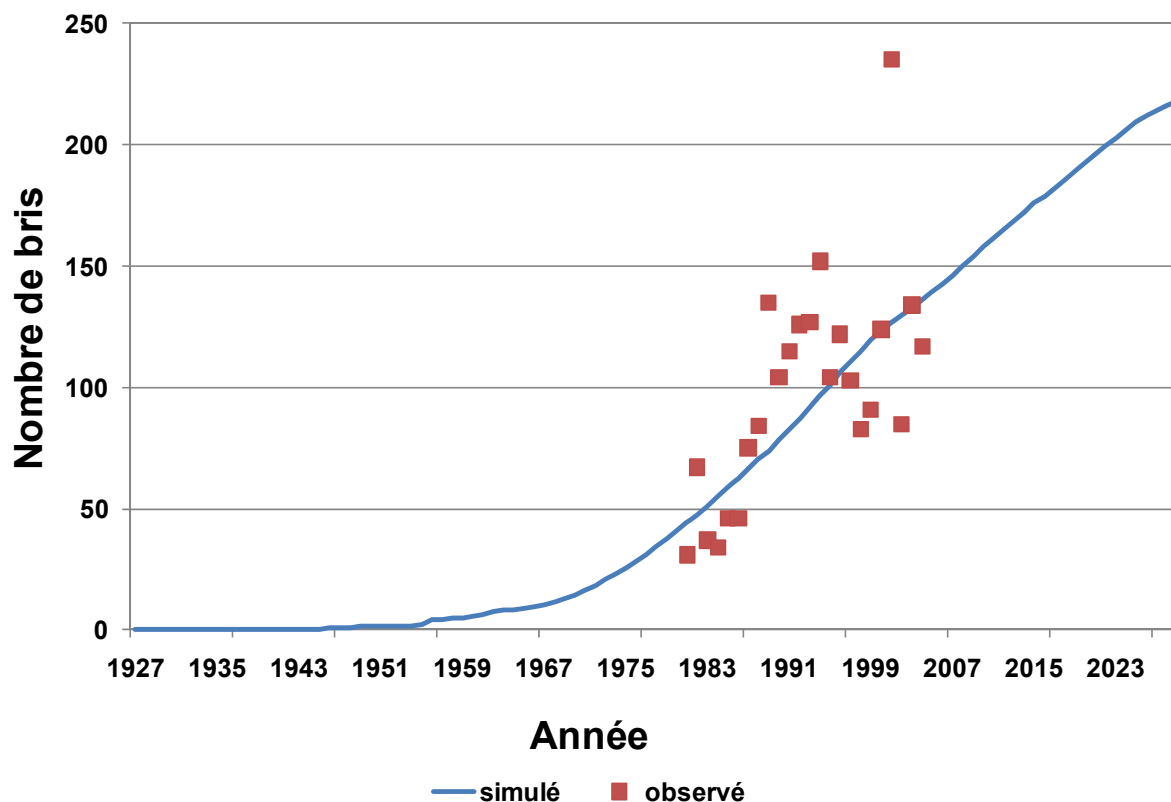


Figure 9 : Nombre de bris simulé avec le modèle de taux de bris en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.

À la Figure 10, on compare les résultats du modèle de taux de bris (modèle *TB*) à ceux du modèle de nombre de bris (modèle *EEEST*, équation 1). La différence entre les deux modèles s'explique par la différence entre la nature des informations qui sont traitées. Dans la modélisation du nombre de bris, l'information utilisée est celle du nombre de bris par conduite sans tenir compte de sa longueur. Dans le modèle de taux de bris, on traite le nombre de bris par unité de longueur (ici 1 000 m). Malgré ces différences, on se doit de constater que les écarts entre les deux modèles sont faibles. Les deux modèles montrent une augmentation significative des bris si aucune intervention n'est réalisée sur le réseau. Les résultats de la modélisation du taux de bris viennent corroborer les résultats obtenus avec le modèle du nombre de bris. En effet, on peut constater, au Tableau 4, que pour les années 2021 et 2029, l'écart entre les deux prévisions est de moins de 18 %. Puisque les modèles du nombre de bris

et du taux de bris donnent des résultats similaires, aucun scénario de remplacement n'a été simulé avec le modèle de taux de bris.

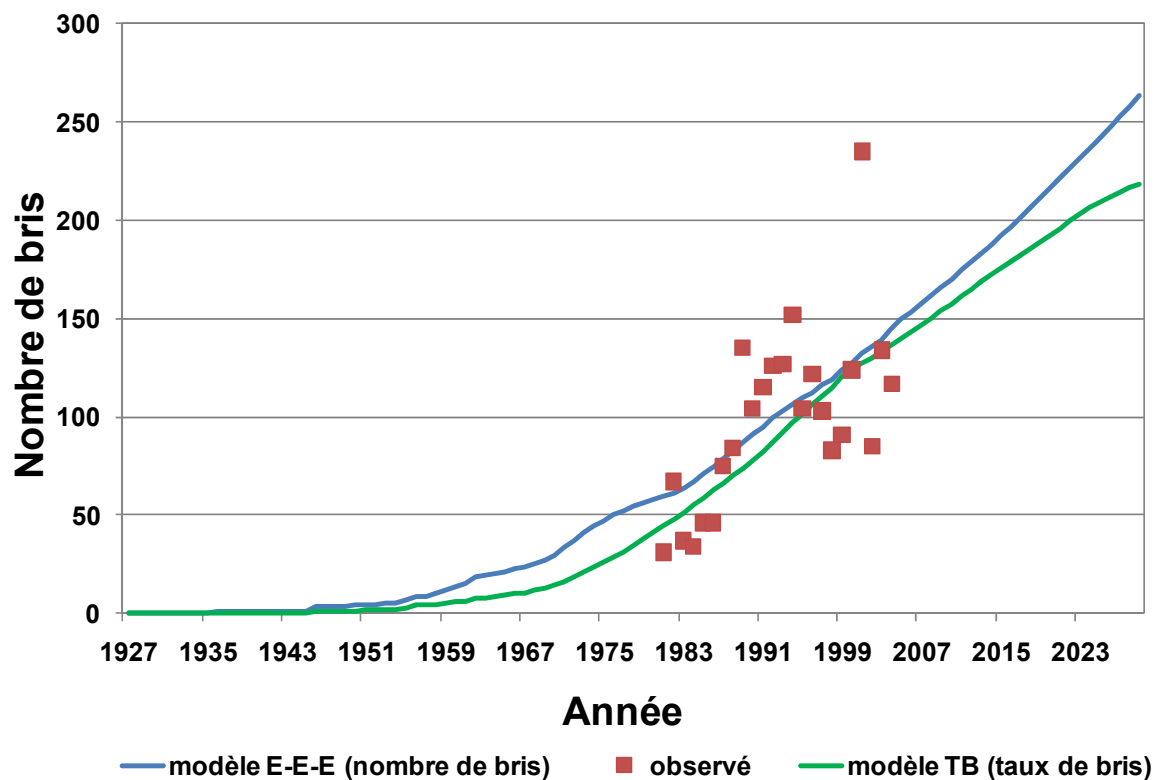


Figure 10 : Nombre de bris simulé par les modèles *EEEST* et *TB* et comparaison avec les observations.

Tableau 4 : Nombre de bris simulé de 1981 à 2029.

Année	Nombre de bris					
	1981	1991	2001	2011	2021	2029
Modèle <i>TB</i>	44	82	127	161	196	218
Modèle <i>EEEST</i>	60	95	132	174	221	263

2.3 Modélisation de la longueur de conduites atteignant le taux de bris critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans

Sur la base d'une information qui nous a été communiquée par le MAMROT, les réseaux d'aqueduc doivent être analysés en fonction d'un taux de bris critique. On cite l'information qui nous a été communiquée par le MAMROT¹ : « Pour ce qui est du taux de bris critique de 3 bris/km/an et des niveaux 4 ou 5 pour l'égout, il s'agit des taux actuellement reconnus par les experts du milieu et le monde municipal comme étant les seuils de tolérance généralement reconnus comme éléments déclencheurs d'une intervention de renouvellement des conduites en cause. Bien que ces seuils puissent varier selon la vocation de la conduite et l'impact plus ou moins important d'une rupture de service sur celle-ci, ceux-ci seront utilisés dans le cadre de cette étude. Les différents scénarios de remplacement annuel devraient permettre, entre autre, de déterminer le pourcentage annuel de renouvellement de conduite nécessaire pour atteindre, dans 15 ou 20 ans, le plus faible pourcentage possible de conduite présentant un seuil intolérable selon les taux définis. Le pourcentage annuel de renouvellement pour maintenir par la suite ce faible pourcentage de conduite présentant un seuil intolérable pourrait également être présenté à long terme (20-50 ans) ».

L'analyse réalisée pour estimer le taux de remplacement annuel à appliquer selon ce critère est basée sur la construction d'un historique de bris théorique à l'aide du modèle *EEEST*. En effet, avec le modèle *EEEST*, il est possible d'évaluer la probabilité de bris d'une conduite tout au long de sa vie utile (plus de détails sont donnés dans Duchesne *et al.*, 2011). À partir de la fonction de distribution du temps d'arrivée du premier bris, on tire au hasard le temps d'arrivée du premier bris. On fait de même pour le deuxième bris, puis pour les bris subséquents, et ce jusqu'au vingtième bris. Cet exercice a été réalisé pour le réseau de Gatineau, ce qui permet de reconstituer un historique « théorique » des bris pour chacune des conduites; c'est ce que nous appellerons par la suite le « réseau théorique ». On retrouve à la Figure 11 la comparaison entre les résultats du réseau théorique et ceux du modèle *EEEST* appliqué de façon globale (qui donne l'espérance du nombre total de bris pour chaque année). On constate sur cette figure que la simulation théorique des bris est conforme aux résultats précédemment obtenus avec le modèle *EEEST* global.

¹ Courriel de M. René Caissy reçu le 18 janvier 2011.

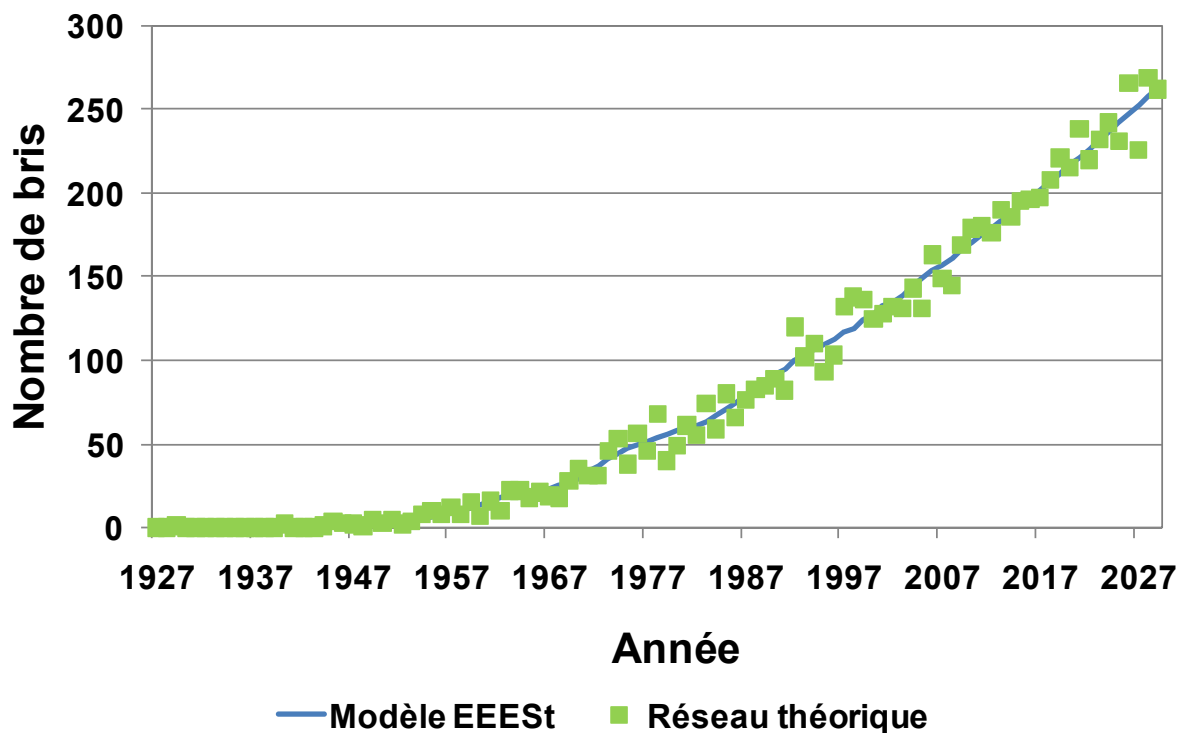


Figure 11 : Comparaison entre les résultats du modèle *EEEST* global et les bris du réseau théorique.

2.3.1 Évaluation du taux de remplacement sur le réseau théorique

Pour réaliser cette évaluation, on utilise l'historique de bris théorique puis on suppose qu'à partir de 2010, on remplace toutes les conduites qui ont atteint le taux de bris critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans. On fait cet exercice pour chacune des années jusqu'en 2029. Pour cette évaluation, on fait l'hypothèse que les nouvelles conduites installées de 2010 à 2029 n'atteindront pas le taux de 3 bris/km/an avant 2029. Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant (Tableau 5).

Tableau 5. Longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an, selon l'historique théorique des bris, si toutes les conduites atteignant le taux critique sont remplacées à chaque année.

Année	Longueur atteignant le taux critique	
	(km)	(% du réseau)
2010	11 536	2,2 %
2011	2 227	0,4 %
2012	3 098	0,6 %
2013	2 422	0,5 %
2014	2 512	0,5 %
2015	3 303	0,6 %
2016	2 781	0,5 %
2017	2 122	0,4 %
2018	2 797	0,5 %
2019	2 301	0,4 %
2020	2 454	0,5 %
2021	2 126	0,4 %
2022	2 759	0,5 %
2023	2 700	0,5 %
2024	1 462	0,3 %
2025	1 697	0,3 %
2026	2 541	0,5 %
2027	1 661	0,3 %
2028	2 285	0,4 %
2029	2 131	0,4 %

On constate au tableau précédent qu'il faudrait, si l'on souhaite remplacer à chaque année toutes les conduites qui atteignent le taux de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans), remplacer 2,2 % de la longueur du réseau la première année, afin de rattraper le retard accumulé au cours des années précédentes. Au cours des 19 années suivantes, le taux de remplacement varie d'année en année et affiche une valeur moyenne de **0,5 % par année**.

Ainsi, ceci signifie qu'en moyenne un taux de remplacement de 0,5 % par année permettrait de respecter le critère de 3 bris/km/an, **à condition que toutes les conduites qui atteignent ce taux de bris soient remplacées à chaque année**. Bien que ce pourcentage de remplacement conduirait à une augmentation du nombre de bris total sur le réseau (voir Figure 4) et qu'il faudrait prévoir les ressources nécessaires pour faire face à l'augmentation du nombre total de

bris sur le réseau, cette stratégie demande beaucoup moins d'effort de remplacement que celle qui vise à stabiliser le nombre total annuel de bris.

2.4 Taux de remplacement souhaitables pour la ville de Gatineau, secteur de Gatineau

D'après les résultats présentés précédemment, un taux de remplacement annuel moyen de 0,5 %, sur un horizon de 20 ans, permettrait de remplacer les conduites qui atteignent le taux de bris critique de 3 bris/km/an (à condition que les 2,2 % de conduites qui rencontrent déjà ce critère soient remplacées la première année). Par ailleurs, d'après les résultats présentés aux Figures 4 et 5, c'est un taux de remplacement annuel moyen de 1,5 % à 2,0 % du linéaire de conduites qui permettrait de stabiliser le nombre de bris annuel sur 20 ans. Dans Villeneuve *et al.* (1998), les chercheurs de l'INRS recommandaient un taux de remplacement annuel de 1,5 % afin de maintenir le nombre de bris constant à partir de 1996. Or, on constate à la Figure 2 que le nombre de bris observés a continué de croître après 1996 et qu'il s'est même accéléré. Cet accroissement s'explique par un taux de remplacement inférieur à 1,5 %. En effet, nous avons évalué que le taux annuel de remplacement moyen au cours des années 1996 à 2006 était de 0,4 % à Gatineau, secteur Gatineau (la Figure 12 montre le taux de remplacement annuel calculé pour chaque année, tel qu'estimé à partir des données fournies par la Ville, en appliquant la méthodologie décrite en détails au chapitre 4 de ce rapport). Ce taux de remplacement a été insuffisant pour maintenir le nombre de bris constant depuis 1996. Toutefois, selon les résultats obtenus dans le présent rapport (voir section 2.3), ce taux de remplacement de 0,4 % serait proche de celui qui permettrait effectivement de remplacer les conduites qui atteignent le taux de bris critique de 3 bris/km/an, soit 0,5 % (à condition, bien entendu, que le retard accumulé soit comblé la première année).

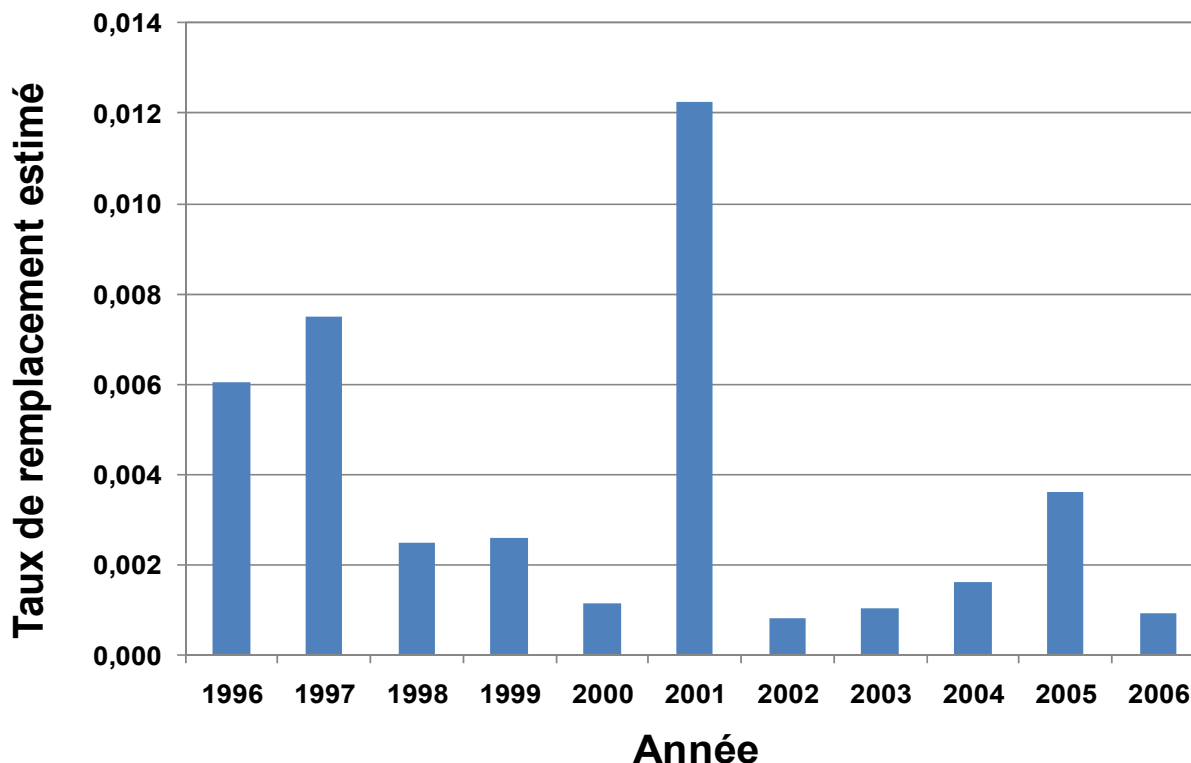


Figure 12 : Taux annuel de remplacement estimé de 1996 à 2006.

2.5 Estimation des coûts

Après avoir étudié l'impact des scénarios de remplacement sur le réseau de conduites d'aqueduc de Gatineau, il s'avère essentiel de faire une évaluation du coût associé à chacun de ces scénarios. Cette évaluation du coût vient appuyer l'étude qualitative faite sur le réseau de conduites d'aqueduc avec l'élaboration des scénarios de remplacement. Ainsi, les coûts de remplacement et de réparation des bris pourraient aider les municipalités à adopter le scénario qui correspondrait le mieux à leurs objectifs. Il s'agit toutefois d'une évaluation rapide des coûts, dont les résultats devraient être confirmés par une analyse économique plus approfondie.

Les coûts ont été estimés pour deux scénarios de remplacement : 1) un remplacement annuel constant de 1,5 % du linéaire de conduites du réseau pendant 20 ans, qui permettrait, selon nos estimations, de stabiliser le nombre annuel de bris sur le réseau (scénario A); et 2) un remplacement de 2,0 % du linéaire la première année et de 0,5 % du linéaire au cours des

19 années suivantes, taux qui devraient permettre, selon nos analyses, de remplacer les conduites atteignant le taux de bris critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans (scénario B). Pour le scénario A, on choisit les conduites à remplacer des plus vieilles vers les plus jeunes.

Pour chacun des ces scénarios, le coût total est donné par la somme des coûts de remplacement et des coûts de réparation des bris. Les coûts d'entretien du réseau ne sont pas compris dans ces estimations.

2.5.1 Coûts de remplacement

On sait que le coût de remplacement ou de réparation d'une conduite dépend de plusieurs paramètres (diamètre, sans voirie, avec réfection, etc.). Le Tableau 6 donne le coût en fonction du diamètre pour différents types d'interventions². Pour notre étude, trois types de coûts ont été retenus : le coût minimal, le coût maximal et le coût moyen. Le premier est le coût sans voirie, qui correspond au coût minimal. Le deuxième correspond au coût total avec trottoirs, qui représente ici le coût maximal. Le dernier est le coût moyen calculé en faisant la moyenne des coûts sans voirie, avec réfection, total avec bordures et total avec trottoirs.

Tableau 6 : Coûts par mètre de conduite en fonction du diamètre.

Diamètre (mm)	Sans voirie	Avec réfection	Total avec bordures	Total avec trottoirs	Moyenne
150	248 \$	502 \$	743 \$	863 \$	589 \$
200	307 \$	561 \$	802 \$	922 \$	648 \$
250	382 \$	636 \$	877 \$	997 \$	723 \$
300	457 \$	711 \$	952 \$	1072 \$	798 \$

À partir de ces trois types de coûts (en surbrillance au 6), le coût pour chaque année de remplacement de 2010 à 2029 a été calculé (les remplacements ayant commencé en 2010 et une prévision sur 20 ans est choisie ici), et ce pour les taux annuels de remplacement de 0,5 %; 1 %; 1,5 %; 2 %; 2,5 % et 3 %. La Figure 13 donne une illustration des coûts pour le taux de

² Ces informations des coûts de remplacement nous ont été fournies oralement par une firme d'ingénieurs de la ville de Québec. Elles doivent donc être considérées comme une indication des coûts de remplacement.

remplacement de 0,5 %, tandis que le Tableau 7 donne les résultats complets de ce calcul. On note, à la Figure 13, que malgré un pourcentage de remplacement annuel constant, les coûts de remplacement ne sont pas les mêmes à chaque année. Ceci s'explique par la variation de la proportion de conduites de chaque diamètre à remplacer à chaque année.

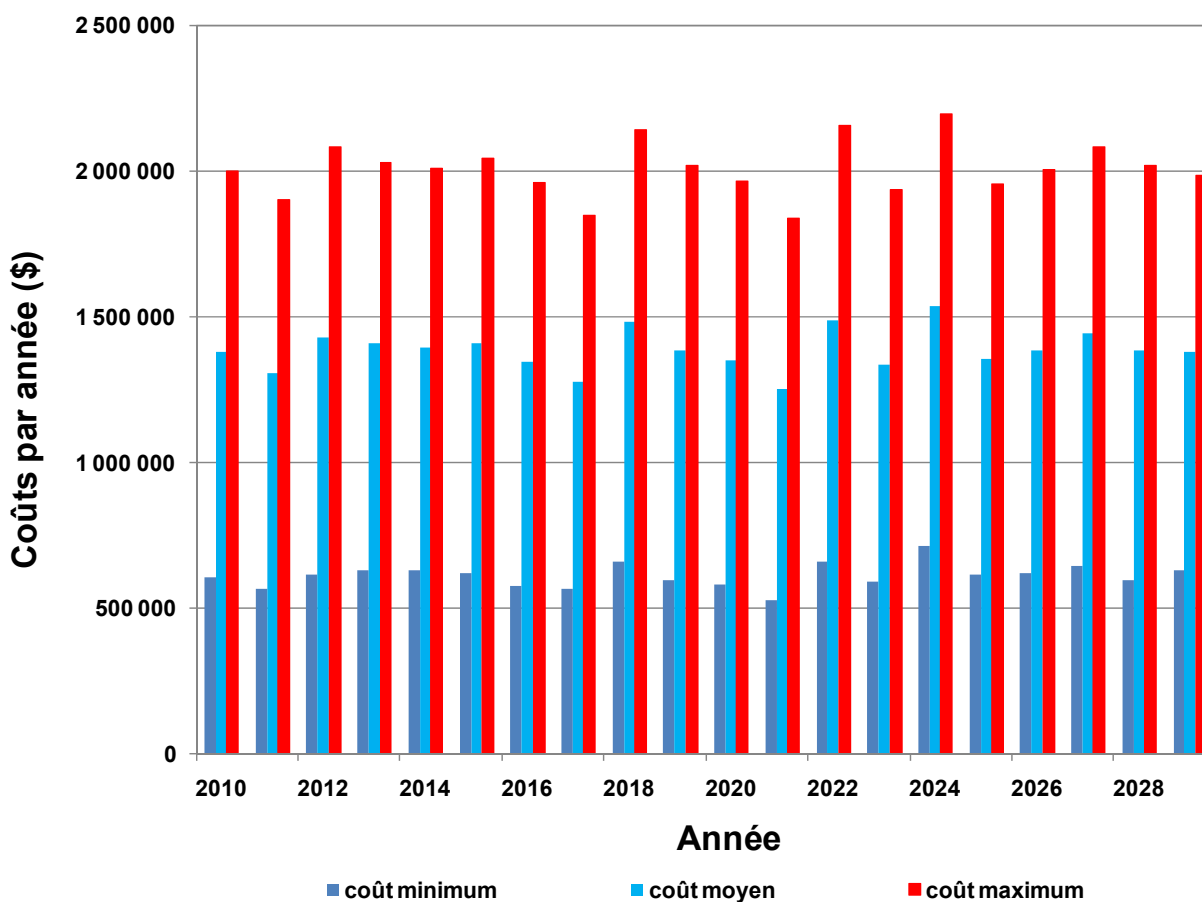


Figure 13 : Coûts annuels pour 0,5 % de remplacement.

Tableau 7: Coûts de remplacement annuels moyens de 2009 à 2029 (en dollars canadiens) en fonction du taux de remplacement.

Taux Coûts	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %	2,5 %	3 %
Coût sans voirie	611 886	1 249 291	1 917 299	2 589 324	3 264 440	3 948 236
Coût moyen	1 385 387	2 798 532	4 241 203	5 688 619	7 137 455	8 598 122
Coût total avec trottoirs	2 006 910	4 043 377	6 108 503	8 178 962	10 249 496	12 334 394

Ainsi, si on considère les coûts de remplacement moyens, le coût de remplacement sur 20 ans pour le scénario A serait de l'ordre de $4,24 \text{ M \$}/\text{an} \times 20 \text{ ans} = 85 \text{ millions de dollars}$. Pour le scénario B, le coût total de remplacement serait d'environ $5,7 \text{ M \$} + 1,4 \text{ M \$}/\text{an} \times 19 \text{ ans} = 32 \text{ millions de dollars sur 20 ans}$.

2.5.2 Coûts de réparation des bris

Pour évaluer les coûts de réparation des bris, on suppose un coût de réparation moyen de 10 000 \$/bris. Ce coût approximatif moyen est celui souvent cité dans la littérature (par exemple, dans Uni-Bell PVC Pipe Association, 2011). Le nombre annuel de bris pour chacun des scénarios est estimé à l'aide du modèle *EEES*t, en supposant un taux de remplacement annuel de 1,5 % pour le scénario A et de 0,5 % pour le scénario B (voir les tableaux 19 et 21 en annexe). De cette façon, on obtient un coût total de réparation de 34 M \$ sur 20 ans pour le scénario A et de 39 M \$ sur 20 ans pour le scénario B.

2.5.3 Coûts totaux

Ainsi, le coût total estimé du scénario A, selon lequel on remplace annuellement 1,5 % du réseau pendant 20 ans afin de stabiliser le nombre annuel de bris, est de 119 millions de dollars, tandis que le coût total estimé du scénario B, selon lequel on remplace pendant 20 ans les conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/ans (calculé sur 5 ans), est de 71 millions de dollars.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, deux modèles différents ont été développés et comparés pour prédire l'évolution de l'état des conduites d'aqueduc de la ville de Gatineau (secteur Gatineau).

En premier lieu, nous avons utilisé un modèle de survie pour prédire le nombre de bris annuel, le modèle *EEEST*. De nouveaux algorithmes de calcul ont été développés pour caler les paramètres et pour simuler le nombre annuel de bris de l'ensemble du réseau. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour l'estimation de la valeur des paramètres du modèle. Les paramètres obtenus avec cette méthode conduisent à des simulations qui, à notre avis, représentent bien l'évolution du nombre de bris en fonction de l'âge. En utilisant le modèle *EEEST*, nous avons simulé l'impact sur le nombre annuel de bris de deux types de remplacement et ce, pour différents taux de remplacement annuel. Nous avons constaté qu'il faut remplacer environ 1,5 % du linéaire de conduites par année pour maintenir le nombre de bris constant à partir de 2010 pour le secteur Gatineau de la ville de Gatineau.

Par la suite, nous avons développé un modèle de prédiction basé sur les taux de bris, et donc tenant compte de la longueur des conduites. Nous avons pu observer que les prédictions de ce modèle et du modèle *EEEST* sont similaires.

À l'aide du modèle *EEEST*, nous avons par la suite calculé la longueur de réseau atteignant, à chaque année, le taux critique de 3 bris/km/an (en moyenne sur 5 ans). Les résultats obtenus dans le cadre de cette analyse montrent que, si on souhaite remplacer à chaque année les conduites qui atteignent le taux de bris critique de 3 bris/km/an, il faudrait remplacer 2,2 % du réseau la première année, afin de rattraper le retard accumulé au cours des années précédentes, puis par la suite appliquer un taux de remplacement de 0,5 % par année en moyenne. Ce taux moyen de remplacement ne pourrait être obtenu que si l'on remplace réellement, à chaque année, toutes les conduites qui atteignent ce taux de bris. Il faut toutefois noter que ce pourcentage de remplacement conduirait à une augmentation du nombre de bris total sur le réseau. Ainsi, si ce scénario de remplacement était retenu, il faudrait prévoir les ressources nécessaires pour faire face à l'augmentation du nombre total de bris sur le réseau.

Selon une évaluation rapide des coûts, le coût total sur 20 ans de ce scénario est de 71 millions de dollars (32 M \$ pour les remplacements de conduites et 39 M \$ pour les réparations de bris). Quant au scénario qui permet de stabiliser le nombre annuel de bris, qui correspond à un taux de remplacement annuel de 1,5 %, son coût total estimé sur 20 ans est de 119 millions de

dollars (85 M \$ pour les remplacements et 34 M \$ pour les réparations de bris). Ainsi, sur la base de ces estimations, on constate qu'il serait plus avantageux, d'un point de vue économique, de ne remplacer à chaque année que les conduites qui atteignent le taux critique de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans), en prenant soin de rattraper le retard la première année de la mise en place de cette stratégie.

NB : Notons que ces recommandations sont fondées sur les bases de données (bris et conduites) qui nous ont été fournies par la Ville de Gatineau. La valeur et la qualité des résultats sont intimement liées à la précision, à la qualité et à la quantité des données qui nous ont été fournies.

De plus, les prévisions de bris sont basées sur un historique de bris qui tient compte de la qualité et de la nature des conduites installées à l'époque (c.-à-d. depuis la naissance du réseau) ainsi que des pratiques d'installation d'alors. On reconnaît que la qualité des matériaux et que les pratiques se sont peut-être améliorées au cours des années. Ceci signifie que les nouvelles conduites pourraient présenter un taux de bris moins important que celles qui ont servi à caler notre modèle. On en déduit que, à long terme, le réseau pourrait être plus fiable et démontrer un taux de bris plus faible que celui observé par le passé. Cette situation conduirait, à long terme, à des investissements moins importants pour maintenir le réseau dans un état satisfaisant.

Soulignons finalement que les bases de données fournies par la Ville de Gatineau ont dû être vérifiées, réorganisées et restructurées. Les détails de ces travaux sont donnés aux chapitres suivants.

Enfin, pour améliorer la qualité des informations utiles pour réaliser des études similaires à celle que nous venons de réaliser, nous recommandons spécifiquement que le responsable de la gestion du réseau s'assure que chaque bris de conduite soit bien répertorié dans une base de données structurée. Une base de données à jour permet en premier lieu de repérer les secteurs les plus problématiques, mais aussi, à long terme, de dresser un bilan exact de l'état du réseau. Pour se faire il faut :

- centraliser l'information;
- mettre à jour régulièrement les bases de données;
- garder l'historique des conduites (nombre de bris, date de bris, type de réparation, nom de la rue et numéro civique);

- tenir un registre des fuites sur les conduites; s'assurer que les codes corporatifs d'identification des conduites correspondent aux codes corporatifs de la base de données des conduites; indiquer le lieu de la fuite en mettant le nom de la rue et le numéro civique de la maison la plus près;
- préconiser l'utilisation de systèmes d'information géographique.

3. Création de la base de données des bris d'aqueduc de la ville de Gatineau, secteur de Gatineau

3.1 Données initiales fournies par la Ville

La Ville de Gatineau nous a fourni un fichier ACCESS comportant les données suivantes :

- ✓ GatConduites.mdb, qui regroupe tous les attributs du réseau d'aqueduc;
- ✓ un dossier « domaines », regroupant des tables « .dbf » explicitant tous les codes utilisés dans la table GatConduites;
- ✓ données sur les bris de conduites d'eau potable.

La Ville de Gatineau nous a fourni deux bases différentes de bris de conduites d'eau potable. Selon la personne ressource, une base provient directement de la Ville et l'autre base provient du service des travaux publics. Le premier fichier reçu de la Ville comprend seulement des bris de conduites survenus à partir de l'année 1990 (voir Figure 14). Nous remarquons que les trois dernières années affichent un nombre de bris non représentatifs de la tendance observée pour les années précédentes.

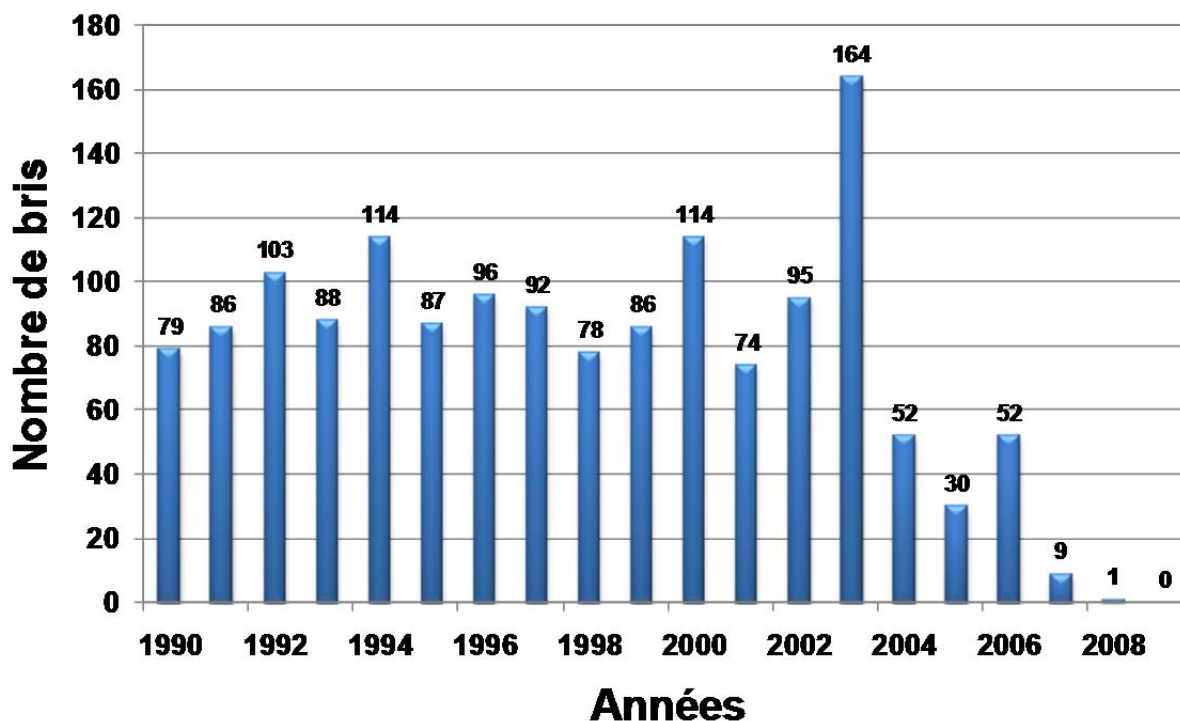


Figure 14 : Nombre de bris répertoriés de 1990 à 2008 selon la base commençant en 1990.

Quant à la base construite par le service des travaux publics, nommée « [Liste de tous les bris depuis 1981 avec l'année de remplacement.xls](#) » (appelée dans la suite de ce rapport « [Bris81](#) »), elle contient tous les bris répertoriés de l'année 1981 à l'année 2006. Afin d'avoir une idée de la fiabilité de cet archivage des bris, nous avons tracé un graphique du nombre de bris répertoriés à chaque année de l'historique. La Figure 15 montre cet historique de bris. Contrairement à la première base pour laquelle il nous manquait neuf années (1981-1990, voir Figure 14), la base de données complétée par les travaux publics montrent une tendance qui s'approche plus de ce à quoi on pourrait s'attendre (sauf pour les années 2005 et 2006). Nous avons donc décidé d'utiliser la base « [Bris81](#) ».

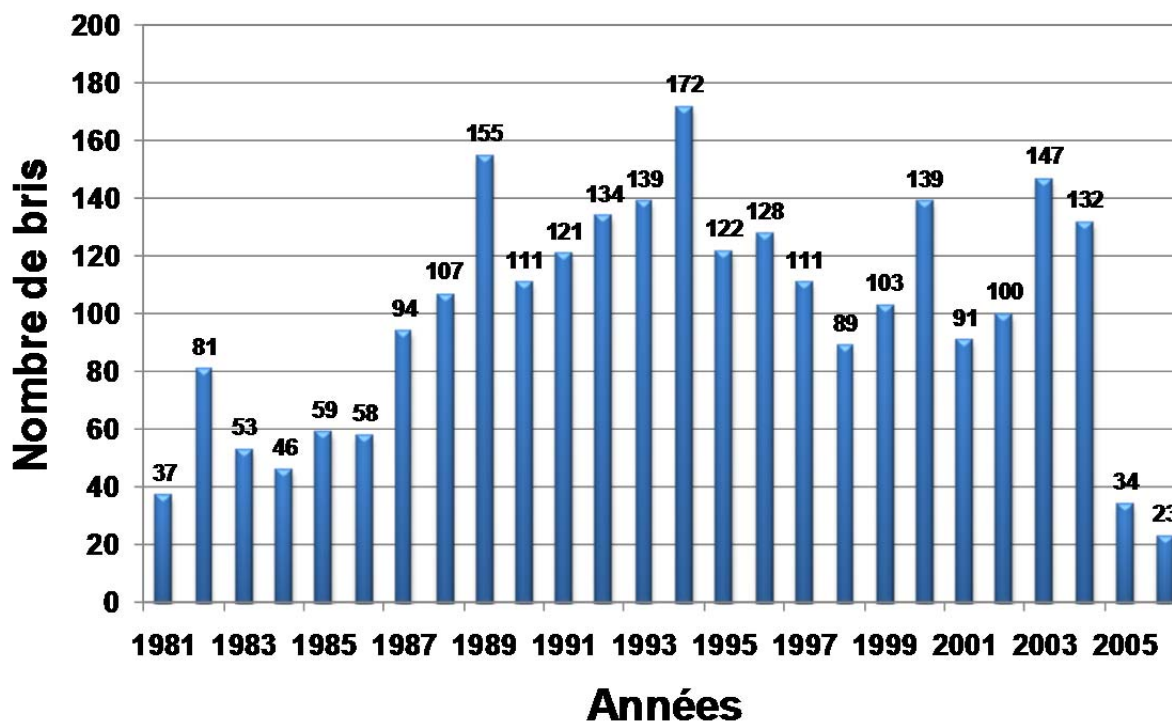


Figure 15 : Nombre de bris répertoriés de 1981 à 2006 (base « Bris81 »).

Dans ce qui suit, nous donnerons les détails des opérations effectuées pour la localisation des bris présents dans le fichier envoyé par le service des travaux publics, « Bris81 ». Comme mentionné plus haut, ce fichier résume toutes les fuites du réseau d'aqueduc survenues durant la période de 1981 à 2006. Pour le modèle de prédiction cependant (voir chapitre 1), seuls les bris de 1981 à 2004 ont été utilisés, puisqu'il est fort probable que la base de données des bris ne soit pas complète pour les années 2005 et 2006, comme on peut le constater à la Figure 15.

Selon la base « Bris81 », le nombre de bris total du secteur de Gatineau est de 2 760. Ces bris sont répertoriés sur des adresses ayant comme information soit un numéro civique, soit un coin de rue ou bien seulement le nom de la rue, sans localisation exacte. Le Tableau 8 montre quelques données fournies dans la base de bris.

Tableau 8 : Exemples de données fournies dans le fichier original.

chaRue	chaNoCivique	chaAngle	Date	Remplacement
rue Alfred	7		2005	
1 ^{ère} Avenue		Maloney	81	
boulevard Saint-René Ouest			1986	1997

La base de données des bris contient en tout 2 755 bris signalés entre les années 1981 et 2006.

Exemple avec numéro civique : Bris sur 99, rue Sanscartier

Exemple avec coin de rue : Bris sur coin, rue Saint-James / rue East

Exemple avec seulement nom de rue : Bris sur boulevard Hurtubise

Cependant, parmi ces 2 755 données, on a constaté certaines remarques de type : « Bris » aussi sur telle adresse de la même rue à la même date. Cela a donc fait augmenter le nombre de bris à 2 760. Ce même fichier comprend aussi 169 bris ayant comme date le chiffre « 1 ». Après communication avec la ville, cette date a été interprétée comme l'année « 2001 ».

Comme le tableau suivant l'indique (Tableau 9), la base de données de bris reçue contient en tout 2 760 bris signalés entre les années 1981 et 2006.

Tableau 9 : Nombre de bris en fonction du type de localisation utilisé.

Nombre de bris ayant une adresse avec numéro civique	2 017
Nombre de bris localisés sur l'intersection de deux rues ou selon des repères	645
Nombre de bris avec seulement le nom de la rue	98
Nombre de bris total	2 760

Afin d'exploiter les adresses avec numéro civique, nous avons demandé à la Ville de Gatineau de nous fournir une base de tous les numéros civiques ainsi que les noms de rue correspondants. À notre demande, la Ville de Gatineau nous a envoyé un fichier Excel

(NuméroCivique.xls) qui contient ces informations (voir Tableau 10). De ce fichier, nous avons exploité les coordonnées géographiques (X, Y) des numéros civiques et nous leur avons affecté les bris survenus sur ces mêmes adresses.

Tableau 10 : Exemple de données fournies dans le fichier 'NuméroCivique.xls'

Numéro civique	Adresse complète	X	Y
24	24, avenue Gatineau	365139	5037680
150	150, avenue de la Drave	367929	5039009

Dès réception de ce fichier, des programmes sous Visual Basic ont été développés afin d'associer automatiquement les fuites identifiées par un numéro civique aux coordonnées (X, Y) de ces mêmes numéros. Cependant, les programmes n'ont pas pu fonctionner dès le premier traitement puisque la majorité (environ 70 %) des noms de rues de la Ville de Gatineau (secteur de Gatineau) qui se trouvent dans le fichier « Bris81 » ne correspondent pas aux noms de rues du fichier « NuméroCivique.xls ». La section suivante décrit les étapes qui ont dû être suivies pour la mise en forme de la base de données des bris du secteur de Gatineau.

3.2 Étapes suivies pour la mise en forme de la base de bris

3.2.1 Modification de l'orthographe de l'adresse du bris

Avant de répertorier les bris sur des conduites, plusieurs tâches ont été effectuées. La première chose à modifier, dans la base de données des bris initiale, est le nom de rue sur laquelle le bris a été répertorié. En effet, dans la base de données reçue, l'orthographe des noms de rue diffère de celle du fichier « [NuméroCivique.xls](#) » et de celle de la couche ArcGIS « [Réseau-Routier](#) ». Tel que souligné plus haut, sans cette modification, la correspondance avec un code Visual Basic, entre le fichier « [Bris81](#) » et le fichier « [NuméroCivique.xls](#) » est impossible.

En effet, les noms qui figurent dans le fichier des numéros civiques correspondent à la nouvelle appellation choisie par la Ville après la fusion³. Ainsi, cette différence entre les noms est due soit aux changements effectués sur les noms de rues après la fusion des villes, soit à des erreurs d'orthographe, omissions de lettres, absences d'accents, notations de *rue* au lieu de *boulevard*, et bien d'autres différences de syntaxe entre les deux fichiers.

3.3 Exemple de modification des noms de rue sur le fichier de bris initial

Afin de retrouver la bonne appellation des rues, nous avons remplacé tous les noms qui ont une orthographe différente (accents, abréviations, type d'artère non existant, etc.) par le nom utilisé dans la base de données « Réseau Routier » et « NuméroCivique.xls » (voir Tableau 11).

Tableau 11 : Exemples de modifications apportées sur les noms de rues.

Nom original	Coin	Nom INRS	Coin INRS	Modification apportée INRS
Archambault	Saint-jean Baptiste	rue Saint-Louis	rue Jacques-Cartier	Changement de noms après fusion
Champlain	Onezime	rue de la Baie	rue Onésime	Orthographe et changement de nom après fusion
3 ^{ème} avenue	St-James	rue Napoléon-Groulx	rue Saint-James	Orthographe et changement de nom après fusion
Greber	Archambault	boulevard Gréber	rue Saint-Louis	Type d'artère non défini et changement de nom après fusion
E.-Lortie		rue Eugène-Lortie		Abréviation et type d'artère non défini

³ En 2001, les municipalités de Buckingham, Aylmer, Gatineau, Hull et Masson-Angers ont été fusionnées dans le cadre de la politique de consolidation municipale du gouvernement québécois. La nouvelle Ville créée a pris le nom de Gatineau.

http://www.vrm.ca/documents/ColloqueTerriroires_AndrewChiasson.pdf

En faisant une recherche sur Internet, nous avons pu trouver un document⁴ qui rassemble tous les changements d'adresses appliqués à cette ville en 2001. Le Tableau 12 illustre quelques exemples de changements sur les noms de rues de la nouvelle Ville de Gatineau, tels que présentés dans le document. Tous les changements de noms de rues apportés aux adresses de bris sont enregistrés dans la feuille Excel « [ChangeNomFusionOrthogINRS.xls](#) ».

Tableau 12 : Exemples de changements aux noms de rues de la nouvelle Ville de Gatineau.

Anciens noms	Nouveaux noms
1 ^{re} Avenue Est (Gatineau)	Fernand-Arvisais, Rue (Rue)
2e Avenue Est (Gatineau)	Édouard-Ellis, Rue (Rue)
3e Avenue Est (Gatineau)	Napoléon-Groulx, Rue (Rue)

Durant la tâche de modification des adresses des rues, parfois manuelle, la plus grande difficulté était de répertorier des bris ayant, comme seule information, le nom de rue sans le type d'artère (chemin, boulevard ou rue). En effet, dans la base de données des bris initiale, les adresses ne contenaient pas de type d'artère précis. Un bris qui est répertorié à l'adresse Magnus, par exemple, peut bien se trouver sur la rue Magnus Est ou sur la rue Magnus Ouest. Il fallait donc se servir de Google[®] Map, à chaque adresse de bris, pour vérifier si le numéro civique ou le coin de rue fourni correspondait à l'adresse située à l'Est ou à l'Ouest. Cependant, dans le cas où aucune autre information exacte n'est disponible, ces bris ne seront malheureusement pas répertoriés.

Après tous les changements effectués par l'INRS sur les adresses de la base de données des bris de la Ville de Gatineau (secteur de Gatineau), il aurait été très laborieux de vouloir retrouver les anciennes appellations et les dates de bris si on n'avait pas affecté un code à chaque bris *a priori*. En effet, la nouvelle base reconstruite contient des informations complètement différentes de la base originale, à cause des changements sur les noms de rue et sur l'orthographe. C'est pour cela que nous avons affecté des codes aux 2 760 bris qui se trouvent dans la base de données (de BR 1 à BR 2760). Ces codes sont rajoutés premièrement dans le fichier de la mise en forme « [MiseEnFormeINRS.xls](#) », qui remplace le fichier initial et qui résume tous les bris survenus dans la ville de 1981 à 2006. C'est dans ce fichier que nous trouvons toutes les

⁴ Disponible en ligne : <http://www.toponymie.gouv.qc.ca/ct/pdf/gatineau.pdf> (dernière consultation : 28/03/2010).

modifications d'orthographe, de changement de noms, rajout de numéros civiques sur des coins de rues, etc. Les codes créés dans ce fichier se retrouvent évidemment dans les autres fichiers Excel qui récapitulent les différentes étapes suivies pour la localisation de bris. Ainsi, avec un code de bris qu'on retrouve dans le fichier [FuiteRécupéréNumCivExact.xls](#), nous pouvons retracer son adresse originale et l'adresse que nous lui avons associée ainsi que d'autres détails comme la date de bris et la date de remplacement, quand elle est disponible.

De plus, dans des cas où nous avons un bris localisé sur une intersection de deux rues, nous affectons un numéro civique à ce coin pour pouvoir lui associer automatiquement un bris ayant les mêmes coordonnées (X, Y). Par conséquent, on peut trouver dans les fichiers « [MiseEnFormeINRS](#) » et « [FuiteRécupéréNumCivExact](#) » des adresses avec numéros civiques qui ne figurent pas dans le fichier « [Bris81](#) » tel que reçu.

Les bris qui ont comme information un numéro civique qui n'existe pas dans le fichier [NuméroCivique.xls](#) se voient affecter les coordonnées (X, Y) du numéro civique le plus proche. Mais, si nous ne trouvons pas de coordonnées pour un numéro civique voisin, ce bris ne peut malheureusement pas être répertorié.

Exemple : Bris sur 425, rue Anka. Comme cette adresse n'existe pas dans le fichier « [NuméroCivique.xls](#) » et que nous n'avons que le numéro 424 comme adresse la plus proche, le bris sera dans ce cas répertorié sur le numéro civique 424. Cette adresse sera par la suite recherchée dans le fichier « [NuméroCivique.xls](#) » pour trouver ses coordonnées géographiques (X, Y).

425, rue Anka (n'existe pas) → Le localiser sur 424, rue Anka (X = 369616; Y = 5039428).

Ainsi, tous les bris ayant des adresses avec des numéros civiques exacts ou voisins, disponibles dans ce fichier, se verront placés comme des points sur une carte géographique ArcGIS.

3.4 Affectation des coordonnées géographiques aux bris

Après la modification de l'orthographe des noms de rues, nous avons utilisé un programme Visual Basic pour prendre tous les bris avec des numéros civiques présents dans le fichier « [NumeroCivique.xls](#) » et leur affecter les coordonnées (X, Y) de ces derniers, comme dans l'exemple ci-dessous (Figure 16).

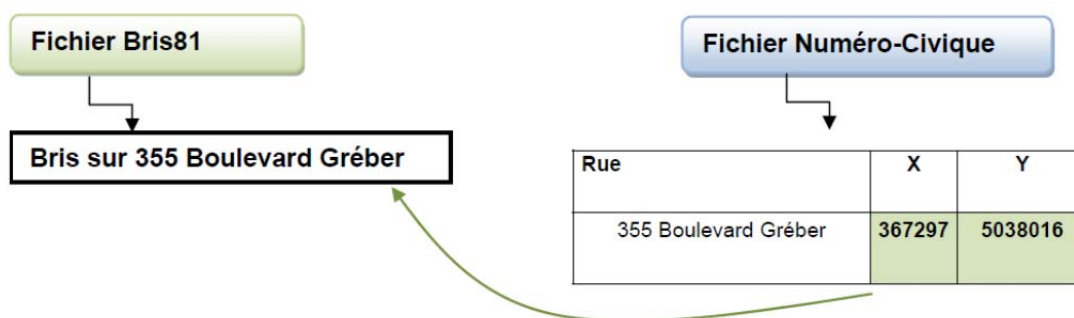


Figure 16. Localisation des bris ayant des numéros civiques avec les (X, Y) de ces derniers.

En appliquant cette procédure sur tous les bris de la base qui ont des numéros civiques, environ 2 005 bris sur 2 017 ont été localisés géographiquement sous ArcGIS à l'aide du numéro civique fourni. Ces résultats sont enregistrés sur la feuille «[BrisRécupCivExactEtCoinINRS.xls](#)».

Pour les bris restants, c'est-à-dire, ceux qui ont des numéros civiques ne figurant pas dans la base « [NuméroCivique.xls](#) », ils se verront affecter les coordonnées géographiques des adresses à proximité, comme expliqué plus haut. Ces derniers résultats sont enregistrés sur la même feuille « [BrisRécupCivExactEtCoinINRS.xls](#) ». En faisant cela, il arrive de trouver un bris, localisé à l'origine sur 120, rue X, se faire répertorier sur une conduite à l'adresse 130, rue X, puisque l'adresse 120, rue X n'existe pas dans le réseau routier de Gatineau.

3.5 Localisation des bris sur les intersections de rues et sur des repères

Comme souligné précédemment, il y a 645 bris qui sont répertoriés soit sur des coins de rues, soit sur des adresses avec des repères connus dans la ville (magasins, écoles, église, etc.). Nous avons récupéré les adresses des coins de rue ainsi que celles des repères, une par une, en faisant une recherche sur Google[®] Map et leur avons assigné des coordonnées (X, Y). Le Tableau 13 montre des exemples de bris que nous avons répertoriés sur un coin de rue et face à un magasin.

Tableau 13 : Localisation des bris ayant comme information un coin de rue ou un repère.

RueGat	CoinGat ou Repères	AdresseINRS	CoordonnéesINRS	CodeBrisINRS
Greber	Face Rossy	66, boulevard Gréber	(367282, 5036235)	BR 1013
Green Valley	EAST	253, rue Green Valley	(371469, 5038836)	BR 1025

La figure suivante (Figure 17) illustre un exemple d'un bris ayant comme adresse le nom de rue et un magasin connu comme repère. Dans ce cas-ci, le bris sera placé sur la conduite N° 14886.

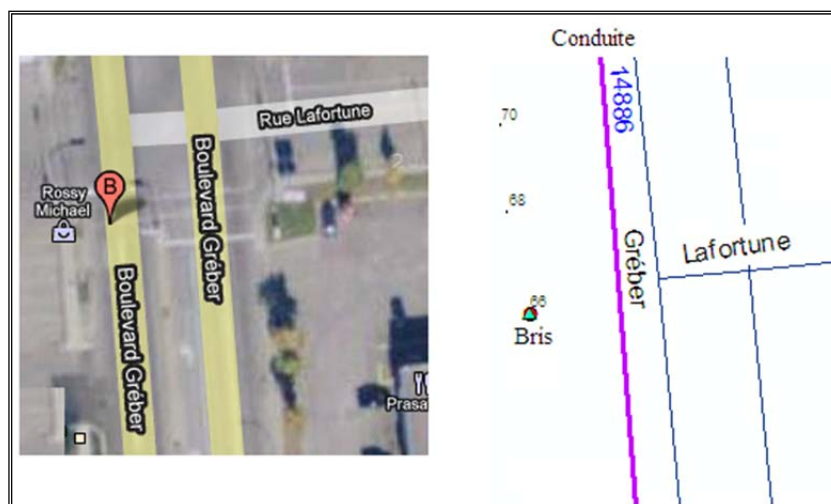


Figure 17 : Localisation d'un bris ayant un magasin comme repère (Google[®] Map et ArcGIS).

Tous ces bris ayant comme adresses des coins de rues ou des repères connus se verront affecter des coordonnées géographiques (X, Y) sous ArcGIS. Ils sont tous enregistrés dans la feuille Excel « [BrisRécupCivExactEtCoinINRS.xls](#) ». Cependant, étant donné que la localisation fournie n'est pas précise, nous ne pouvons pas savoir si le bris doit être répertorié sur la conduite qui se situe à gauche ou sur celle qui est à droite du coin. Cependant, nous estimons que ces conduites doivent avoir les mêmes caractéristiques (matériau, année d'installation, etc.), donc cette incertitude ne devrait pas nuire au modèle de taux de bris à développer.

En appliquant cette procédure sur les bris ayant comme information des coins de rue et des repères, 617 bris sur 645 ont été localisés géographiquement sous ArcGIS. Ces résultats sont enregistrés sur la feuille « [BrisRécupCivExactEtCoinINRS.xls](#) ».

De plus, nous avons trouvé, dans la base de données originale des bris, des adresses et des coins de rues qui n'existent malheureusement pas dans le réseau routier de Gatineau. Nous avons alors contacté M. Dompierre et lui avons envoyé un fichier Excel contenant la liste de tous les bris problématiques (coins de rues et repères), afin qu'il puisse les situer sur le réseau. M. Dompierre nous a renvoyé le même fichier, en y rajoutant les coordonnées géographiques des 46 bris qu'il a pu localiser. Les autres bris restants (28/74) sont demeurés non localisables. Les bris que nous avons pu récupérer après ce contact sont mis en forme et enregistrés dans le fichier Excel « [RécupéréAprèsContactDompierre.xls](#) ».

Même après ce contact, ils nous restent environ 136 bris n'ayant pas d'adresses exactes pour les localiser. Ces 136 bris sont enregistrés dans la feuille Excel « [BrisNonLocalisésTOUS](#) ».

Tous les résultats des bris localisés avec des coordonnées géographiques sur ArcGis en se servant des numéros civiques, des coins de rues ou des repères sont affichables à l'aide du fichier joint de type ShapeFile nommé '[BrisRecuperesCiv_Coin_81_2006INRS.shp](#)'.

Pour résumer, nous avons pu placer en tout 2 624 bris parmi les 2 760 de la base de données (voir Tableau 14). Il reste alors 136 bris que nous n'avons pas pu localiser avec des coordonnées géographiques. Cela est dû principalement au fait que, dans ces cas-là, nous n'avons pas pu trouver les coins de rue, les repères (magasins, etc.) ou le numéro civique dans la couche ArcGis et le fichier « [NumeroCivique.xls](#) ».

Tous les bris, qu'ils soient localisés ou non localisés avec des coordonnées (X, Y), sont enregistrés dans la feuille Excel appelée « [MisEnforme.xls](#) ».

Tableau 14 : Récapitulatif des bris que nous avons pu localiser ou non avec des coordonnées géographiques.

Bris totaux avec N° civique dans le fichier initial	2 017
Bris avec N° civiques qu'on a pu placer avec des (X, Y)	2 005
Bris avec N° civiques qu'on n'a pas pu placer avec des (X, Y)	12
Bris totaux avec repères et coins de rues dans le fichier initial	645
Bris avec repères et coins de rues placés avec (X, Y)	617
Bris avec repères et coins de rues non placés avec (X, Y)	28
Bris totaux avec seulement des noms de rues	98
Bris ayant uniquement un nom de rue, placés avec (X, Y)	2
Bris ayant uniquement un nom de rue, non placés avec (X, Y)	96
Bris totaux dans le fichier initial	(2 017+ 645 + 98) = 2 760
Bris totaux que nous avons pu placer avec (X, Y)	(2 005 + 617 + 2) = 2 624
Bris avec repères et coins de rues, non placés avec (X, Y)	(12 + 28 + 96) = 136

3.6 Jointure des bris aux conduites d'aqueduc

Une fois que tous les bris avec numéros civiques ont reçu des coordonnées géographiques et ont été géo-référencés sur ArcGIS, nous avons appliqué une jointure spatiale automatique entre les conduites et les bris. Cependant, nous avons constaté que certains numéros civiques peuvent être géographiquement plus proches d'une rue voisine que de la rue à laquelle ils appartiennent réellement. Pour pallier ce problème, après la jointure, nous avons comparé tous les noms de rue des bris avec les noms de rue des conduites en se servant d'un programme VBA (Visual Basic). À la fin de la comparaison, les bris qui avaient des noms de rue différents

de ceux des conduites seront listés et remplacés manuellement sur les bonnes conduites, sous ArcGIS. La feuille Excel des bris joints aux conduites de la ville les plus proches est appelée « [FuiteJointureConduite81.xls](#) » (voir exemple au Tableau 15). Le fichier ArcGIS « [JointureBrisConduitesGAT81_2006.shp](#) » contient toutes les informations des bris joints aux conduites que l'on peut aisément afficher sous ArcGIS (voir Figure 18).

Tableau 15 : Exemple de jointure des bris aux conduites les plus proches, sur la même rue.

AdresseBrisINRS	DateBris	X_INRS	Y_INRS	CodeBrisINRS	N° ConduiteINRS
193, rue Fernand-Arvisais	1981	371532	5038567	BR 1	9348
131, rue Édouard-Ellis	1994	371634	5038282	BR 10	6831

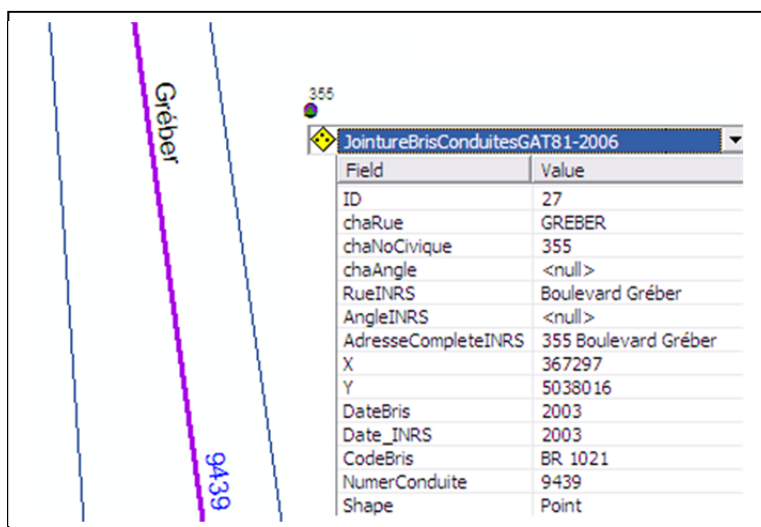


Figure 18 : Exemple d'informations disponibles lors de la jointure d'un bris à une conduite.

Les conduites brisées peuvent toutes être affichées sous ArcGIS en ouvrant le fichier SHP « [AQUGatineauBrisées1981_2006.shp](#) » attaché à ce rapport. Chacune des conduites brisées possède des informations concernant ses caractéristiques intrinsèques, tous les codes de bris survenus à cette même adresse, ainsi que toutes les dates de bris par ordre chronologique (voir Tableau 16). Ces bris peuvent être retracés dans le fichier initial en se servant des codes que nous leurs avons affectés lors de la première étape.

Tableau 16 : Informations disponibles dans le fichier « [AQUGatineauBrisées1981_2006](#) ».

N° Conduite	Année_Instal	Nombre_Bris	CodeBris1	date1	CodeBris2	date2
65	1973	2	BR 268	1992	BR 266	2003

En suivant toutes les étapes citées ci-dessus, nous avons pu joindre 2 425 bris sur un total de 2 624 bris, que nous avons localisés avec des coordonnées géographiques à 1 123 conduites différentes. La conduite qui a le plus de bris (14) a été installée dans les années 1960. Nous incluons aussi dans ce rapport un fichier appelé [AQUGatineauModeleAvecEtSansBris81_2006.shp](#). Ce dernier fichier, que l'on peut afficher sous ArcGIS, contient toutes les conduites du secteur de Gatineau, qu'elles soient brisées ou non. La densité des bris par secteur ainsi obtenue est illustrée à la Figure 19.

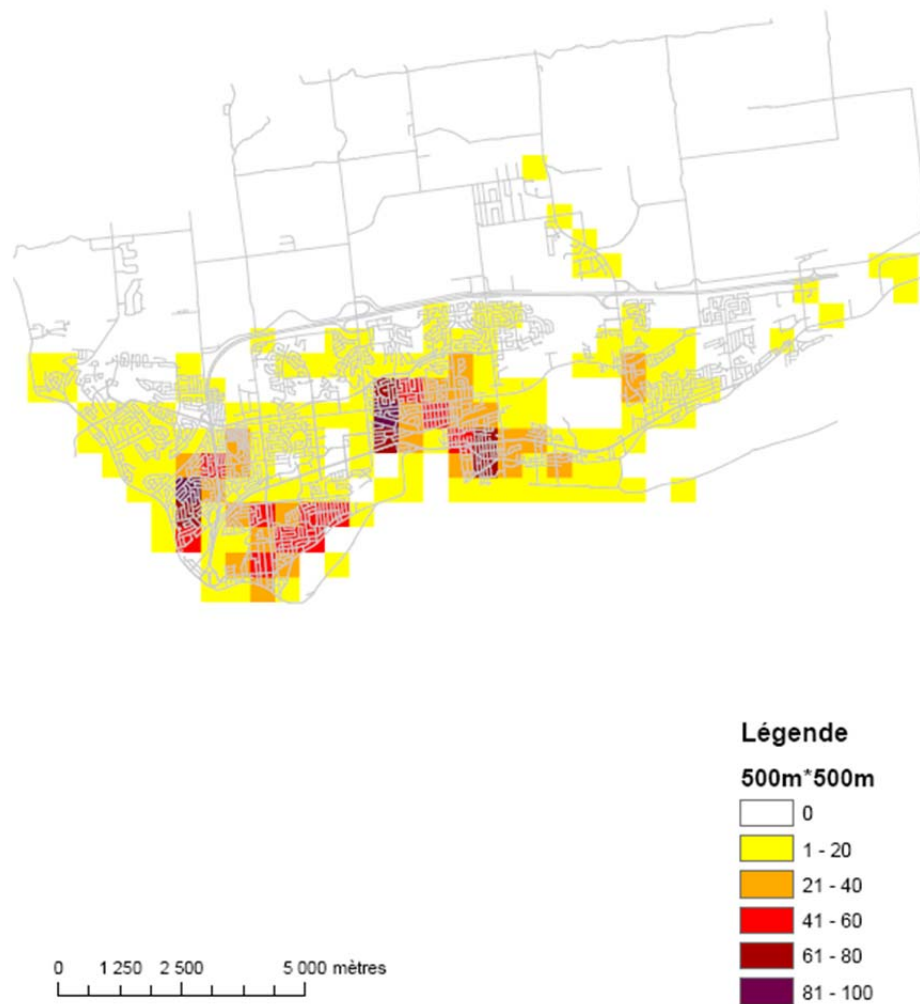


Figure 19 : Nombre de bris enregistrés à Gatineau de 1981 à 2006, par carreau de 500 m par 500 m.

En affichant toutes les conduites brisées selon la base de données des bris mise en forme, nous avons constaté plusieurs cas où la date d'installation des conduites était supérieure à la date d'un bris enregistré sur ces mêmes conduites. Ceci signifie donc que la conduite sur laquelle a réellement eu lieu le bris a été remplacée depuis. Nous avons alors sélectionné toutes les conduites dans cette situation et créé une base de conduites remplacées.

La deuxième partie de ce rapport explique le raisonnement suivi ainsi que toutes les étapes effectuées afin de construire une base de données des conduites remplacées du secteur de Gatineau. La figure suivante (Figure 20) montre un exemple de conduite qu'on a jugée remplacée.

48 Vincent-Legris Conduite Brisée

AQUGatineauBrisées1981_2006

Location: 374 512,397 5 040

Field	Value
FID	915
Shape	Polyline
OBJECTID	4977
QCDIAM	200
QCMATERIAU	2
QCANINSTAL	2001
QCCONDUITI	48
ID	2
NumConduit	48
NbreBris	4
CodeBris1	BR 2739
date1	1995
CodeBris2	BR 2737
date2	1996
CodeBris3	BR 2738
date3	1998
CodeBris4	BR 2740
date4	1999

Figure 20 : Exemple d'une conduite répertoriée par l'INRS comme ayant été remplacée (et non installée) en 2001, étant donné que plusieurs bris y sont survenus entre 1995 et 1999.

4. Estimation des remplacements de conduites du secteur de Gatineau

4.1 Préambule

Cette partie a pour but de décrire toutes les étapes effectuées afin d'identifier les conduites ayant été remplacées dans le système d'aqueduc du secteur de Gatineau de la Ville de Gatineau. Ce document renferme les principales hypothèses utilisées pour identifier les conduites ayant été remplacées ainsi qu'une description de la méthodologie.

4.2 Problématique

La base de données des conduites d'aqueduc du secteur de Gatineau contient les données concernant les conduites en place en 2009, date du transfert à l'INRS de la base de données. En examinant cette base, nous avons remarqué que, lorsqu'une conduite est remplacée, la conduite excavée est effacée de la base de données et la nouvelle conduite mise en terre prend le même numéro que l'ancienne. Nous nous retrouvons ainsi avec certaines conduites pour lesquelles l'année d'installation est postérieure à la date de son premier bris (puisque, dans la base des bris, le bris est associé au numéro de l'ancienne conduite, qui est le même que celui de la nouvelle). Bien que nous connaissions la date des bris, cette seule information n'est pas suffisante pour retracer les informations sur les caractéristiques de l'ancienne conduite remplacée.

Il existe également des conduites ayant été remplacées avant 2009 sans présenter d'anomalies en ce qui concerne les dates de bris. À partir de la base de données des conduites, nous ne pouvons pas identifier quelles sont les conduites qui ont été remplacées avant 2009 et quelles sont les caractéristiques des anciennes conduites. Or, cette information est importante pour le développement du modèle de prédiction des taux de bris.

4.3 Étapes suivies

4.3.1 Carte des années d'installation des tronçons

Il est possible d'afficher les années d'installation des conduites avec le logiciel ArcGIS.

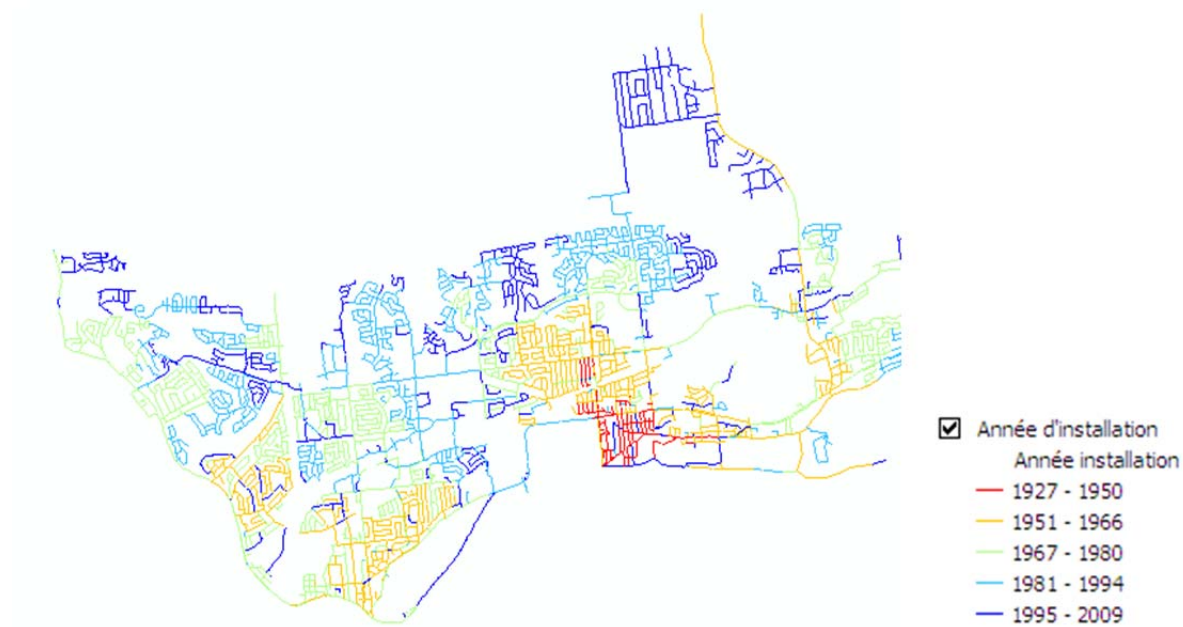


Figure 21 : Années d'installation des tronçons.

On peut ainsi visualiser les quartiers ayant un réseau d'aqueduc relativement ancien ou, *a contrario*, récent.

4.3.2 Carte des matériaux

Il est aussi possible d'afficher les matériaux des conduites avec le logiciel ArcGIS.

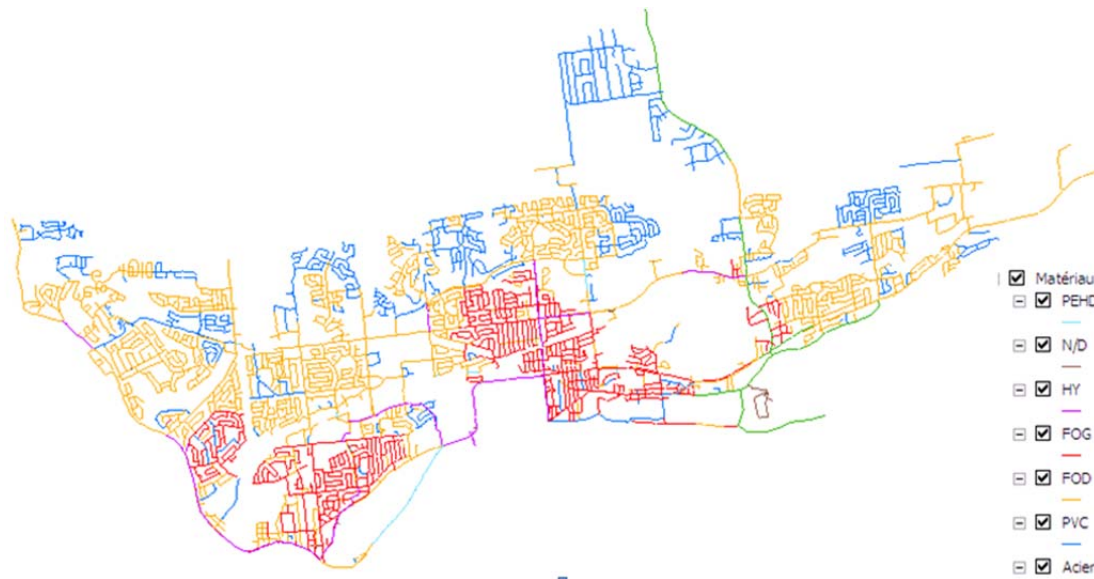


Figure 22 : Répartition des matériaux.

En confrontant les cartes de la Figure 21 et de la Figure 22, on remarque que les tronçons installés depuis 1990 sont majoritairement en PVC, que les tronçons en fonte grise datent des années 1950 à 1980 et que les tronçons en fonte ductile sont présents depuis les années 1970.

4.4 Identification des conduites remplacées

L'identification des conduites remplacées a été réalisée en deux étapes, soit en analysant les dates de bris à l'aide d'ArcGIS et d'Excel, puis en analysant les dates d'installation des conduites par secteur. Les paragraphes suivants décrivent chacune de ces étapes.

4.4.1 Identification des conduites remplacées à partir des dates de bris

Pour identifier les conduites remplacées, on doit, dans un premier temps, trouver les conduites ayant une date de premier bris plus ancienne que l'année d'installation de la conduite. Il est possible de les faire apparaître dans ArcGIS à l'aide d'une commande logique qui sélectionne les conduites ayant une année d'installation plus grande que la date du premier bris sur cette conduite.

Toutes les conduites identifiées comme ayant été remplacées, selon le critère des bris, sont maintenant sélectionnées. Une couche ArcGIS contenant seulement ces conduites est ainsi créée.

Pour chaque conduite ayant été identifiée comme remplacée, l'objectif général est d'ajouter une autre conduite (l'ancienne conduite excavée) dans la base de données, en respectant le plus possible les caractéristiques qu'elle avait possiblement avant son remplacement (matériau, longueur, etc.). L'année d'installation de cette conduite remplacée est estimée en analysant les années d'installation des conduites à proximité. La même méthode est utilisée pour évaluer le matériau de l'ancienne conduite. Pour connaître l'année d'installation des conduites à proximité, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS, qui permet de faire des recherches de conduites et d'afficher les années d'installation.

Pour le territoire du secteur de Gatineau, 130 conduites ont pu être identifiées comme remplacées selon cette méthode.

4.4.2 Identification des conduites remplacées par analyse des années d'installation par secteur

En affichant dans ArcGIS les conduites selon neuf classes d'âge distinctes, on voit très bien sur la carte les conduites qui ont probablement été remplacées. À la Figure 23, par exemple, dans un environnement dans les teintes d'orange (années 1950), il y a une conduite bleue posée en 1998. On juge alors que cette conduite a été remplacée en 1998, que l'ancienne conduite avait été posée en 1955 et qu'elle a été excavée en 1998.⁵

De cette façon, 211 conduites ont été jugées remplacées.

⁵ Cette méthode ne tient pas compte du fait qu'il se peut que la conduite ait été remplacée plus d'une fois.

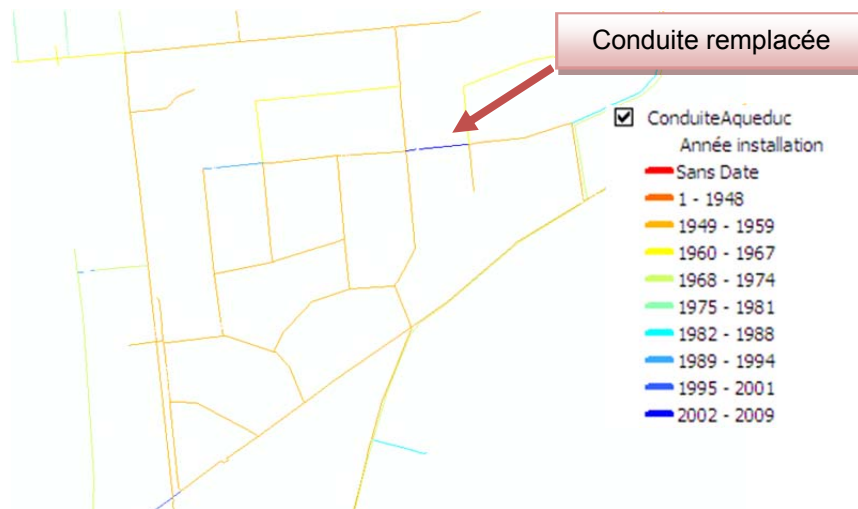


Figure 23 : Affichage dans ArcGIS des conduites possiblement remplacées.

4.4.2.1 Transcription dans Excel

Toutes les opérations et ajouts de conduites ont été faits dans Excel. La méthode utilisée est la suivante :

- ✓ Repérer dans ArcGIS la conduite.
- ✓ Observer aux alentours l'âge et le matériau des conduites plus anciennes.
- ✓ Dans Excel, insérer une ligne sous la conduite déjà repérée.
- ✓ Copier et coller les informations sur la conduite dans cette nouvelle ligne.
- ✓ Inscrire dans le champ « N° de conduites » les lettres INRS à la suite du numéro déjà existant. *Exemple : 123RV devient 123RVINRS.*
- ✓ Inscrire dans le champ « Année de remplacement » la date de pose de la conduite plus récente.
- ✓ Inscrire dans le champ « Année d'installation » la date de pose des conduites aux alentours de la conduite remplacée déjà repérée dans ArcGIS.
- ✓ Lorsqu'il y a plusieurs bris, placer les bonnes années de bris sur la bonne conduite.
- ✓ Redistribuer les bris.
- ✓ Sur ArcGIS, s'il y a autour des conduites remplacées d'autres conduites avec la même date de pose, nous conseillons de les marquer également comme conduites remplacées. Il y a une forte probabilité de retrouver une conduite remplacée sans bris près d'une conduite remplacée avec bris.

Le tableau suivant (Tableau 17) est un exemple du doublement d'une conduite.

Tableau 17 : Exemple du doublement d'une conduite.

	Numéro Conduite	Année d'installation	Année de remplacement	Matériau	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Nombre de bris	Bris1
Ancienne conduite	2944INRS	1960	2004	FOG	150	80.93	1	1985
Nouvelle conduite	2944	2004		PVC	150	80.93	0	

Année de remplacement = Année d'installation

4.5 Résultats

Les résultats de l'analyse des remplacements peuvent être présentés de plusieurs façons. D'une part visuellement, afin de s'assurer que les hypothèses retenues sont plausibles et, d'autre part, à l'aide d'un graphique évaluant le taux de remplacement par linéaire de réseau.

4.5.1 Analyse visuelle des résultats

À chaque fois qu'une conduite était identifiée comme remplacée, celle-ci était ajoutée au fichier Excel, mais également inscrite en bleue directement sur le plan de la ville. Le résultat apparaît à la Figure 24. Le fichier ArcGIS [ConduitesRemplaceesINRS.shp](#), joint à ce présent rapport, peut être utilisé pour visualiser ces résultats.



Figure 24 : Conduites remplacées du secteur de Gatineau (en bleu).

Par cette méthode visuelle, il est possible, pour le gestionnaire du réseau, de vérifier si des conduites identifiées comme remplacées ne sont pas réellement des conduites remplacées, ou vice versa. En fait, le taux de remplacement des conduites estimé par la méthode décrite dans ce rapport risque d'être sous évalué, car dans les cas incertains, les conduites n'étaient pas identifiées comme ayant été remplacées.

4.5.2 Analyse statistique des résultats

Cette analyse des résultats permet d'évaluer le nombre de conduites remplacées et le linéaire de réseau remplacé par année. Cette technique permettra aux gestionnaires de la Ville de Gatineau de valider ou de réfuter nos résultats selon leurs archives de données. La Figure 25 et la Figure 26 présentent respectivement le linéaire de réseau cumulé à chaque année et le pourcentage du linéaire de conduites remplacées à chaque année, tel qu'évalué à partir des résultats obtenus par la méthode présentée dans ce rapport.

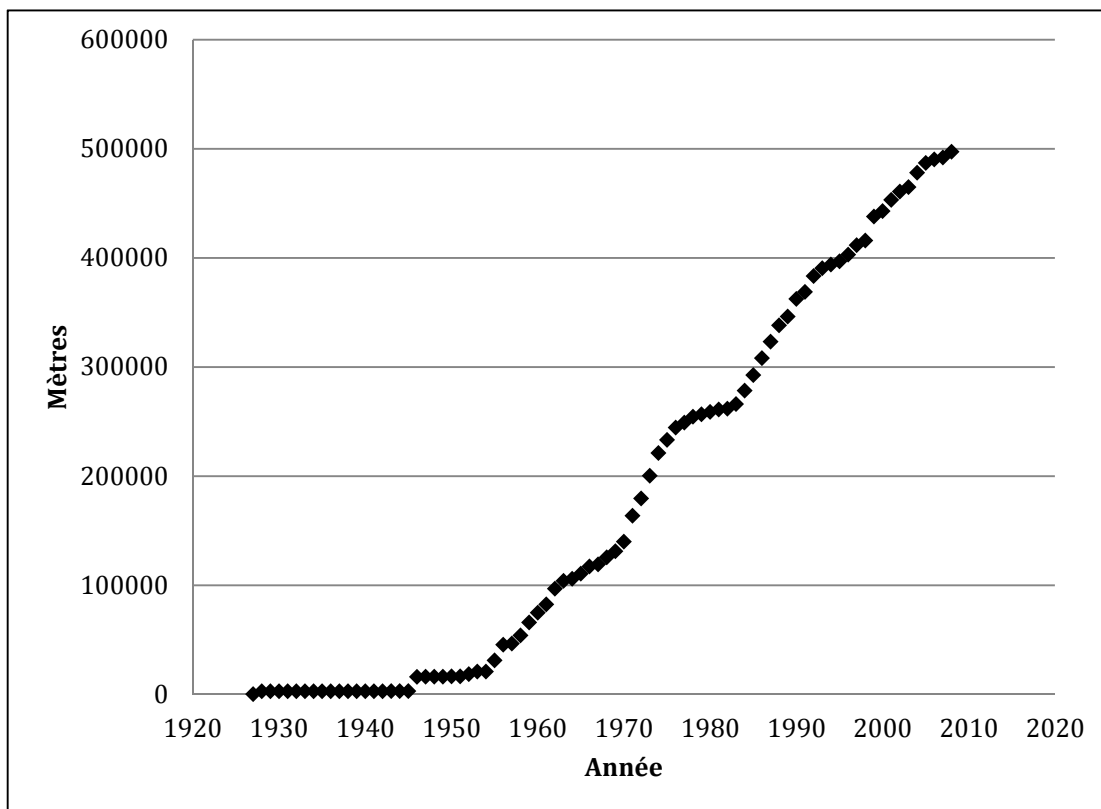


Figure 25 : Linéaire de réseau cumulé.

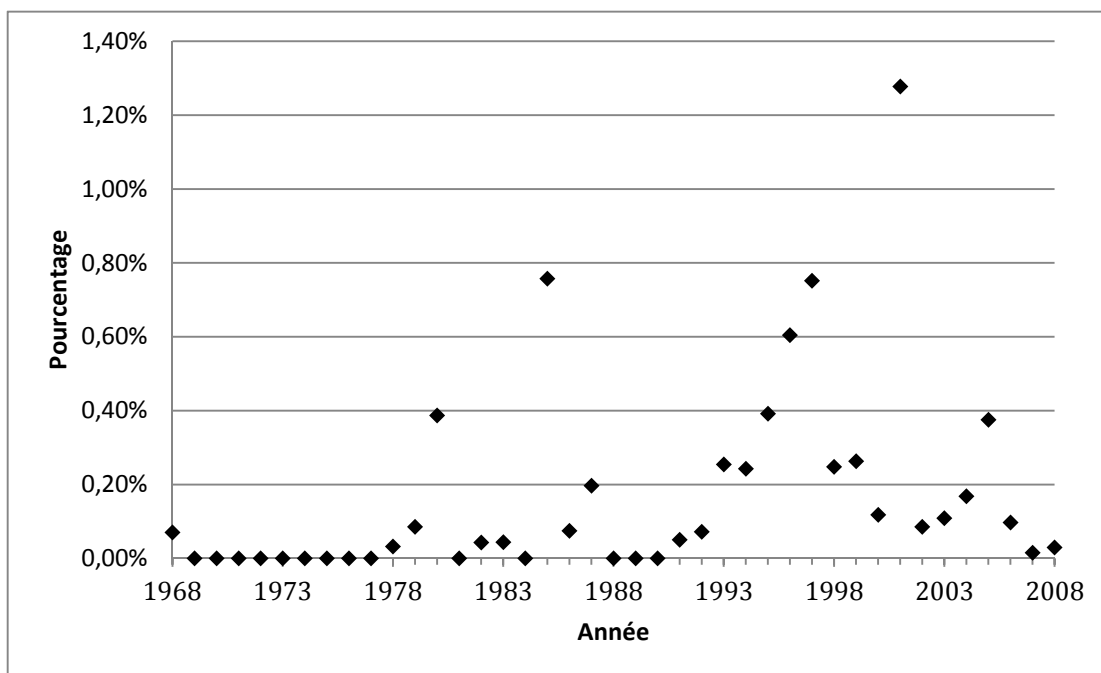


Figure 26 : Pourcentage du linéaire de réseau remplacé par année (m/m).

Remarque : Notons que l'analyse effectuée par l'INRS pour la localisation des bris ainsi que la construction des bases de données des conduites brisées et des conduites remplacées sont fondées sur les données de bris qui nous ont été fournies par la Ville de Gatineau. Sa valeur et sa qualité sont intimement liées à la précision et à la qualité des données qui nous ont été fournies.

5. Références bibliographiques

- Duchesne, S., J.-P. Villeneuve, B. Toubou, N. Bouzida, G. Beardsell, M.-K. Fortin, A. Lucchesi-Lavoie (2011). *Modélisation des bris d'aqueduc et analyse des résultats pour la ville de Québec*. Québec, INRS-ETE, Rapport de recherche N° 1290.
- Efron, B. (1979). Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Ann Stat*, 7(1) : 1-26.
- Mailhot, A., G. Pelletier, J.-F. Noël et J.-P. Villeneuve (2000). Modeling the evolution of the structural state of water pipe networks with brief recorded pipe break histories: Methodology and application. *Water Resour Res*, 36(10) : 3053-3062.
- Pelletier, G. (2000). *Impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre annuel de bris*. Thèse de Doctorat, Institut national de la recherche scientifique (INRS), Québec, Canada.
- Uni-Bell PVC Pipe Association (2011). Water Main Break Clock, <http://www.watermainbreakclock.com> (dernière consultation 27 juillet 2011).
- Villeneuve, J.-P., S. Duchesne, A. Mailhot, E. Musso et G. Pelletier. (1998). *Évaluation des besoins des municipalités québécoises en réfection et construction d'infrastructures d'eaux - Rapport final - INRS-Eau*. Québec, INRS-Eau, Rapport de recherche N° R-512b.

6. Annexes

6.1 Tableaux des bris simulés avec différents scénarios de remplacement

Tableau 18 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 0 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	127
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	170	170
2011	174	174
2012	179	179
2013	183	183
2014	188	188
2015	192	192
2016	197	197
2017	202	202
2018	207	207
2019	211	211
2020	216	216
2021	221	221
2022	226	226
2023	231	231
2024	237	237
2025	242	242
2026	247	247
2027	252	252
2028	258	258
2029	263	263

Tableau 19 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 0,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	171	170
2011	172	174
2012	174	178
2013	177	182
2014	180	186
2015	182	190
2016	186	193
2017	188	197
2018	191	201
2019	194	205
2020	197	209
2021	200	213
2022	203	217
2023	206	221
2024	210	225
2025	214	229
2026	218	233
2027	222	237
2028	226	242
2029	229	246

Tableau 20 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 1 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	128	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	171	171
2011	170	174
2012	172	177
2013	173	180
2014	174	183
2015	175	186
2016	177	189
2017	178	192
2018	181	195
2019	184	198
2020	186	201
2021	187	205
2022	189	207
2023	192	210
2024	193	213
2025	196	215
2026	197	218
2027	199	220
2028	201	223
2029	203	227

Tableau 21 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 1,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	172	171
2011	169	174
2012	168	176
2013	168	178
2014	167	181
2015	169	183
2016	170	185
2017	170	187
2018	171	189
2019	172	191
2020	173	193
2021	172	194
2022	173	196
2023	174	198
2024	175	202
2025	175	201
2026	176	196
2027	177	194
2028	177	193
2029	178	192

Tableau 22 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 2 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	172	171
2011	168	173
2012	165	175
2013	163	177
2014	164	178
2015	164	179
2016	164	180
2017	163	182
2018	162	182
2019	162	183
2020	162	185
2021	161	189
2022	160	180
2023	160	177
2024	160	174
2025	161	170
2026	160	168
2027	161	166
2028	160	166
2029	160	165

Tableau 23 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 2,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	173	171
2011	167	173
2012	163	174
2013	161	175
2014	160	175
2015	159	176
2016	157	176
2017	155	176
2018	154	177
2019	153	177
2020	151	168
2021	150	165
2022	150	159
2023	149	156
2024	147	154
2025	147	153
2026	145	150
2027	143	149
2028	143	147
2029	141	145

Tableau 24 : Bris simulés de 1983 à 2029 avec 3 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1983	64	64
1984	67	67
1985	71	71
1986	75	75
1987	79	79
1988	83	83
1989	87	87
1990	92	92
1991	95	95
1992	100	100
1993	103	103
1994	106	106
1995	109	109
1996	112	112
1997	116	116
1998	119	119
1999	124	124
2000	127	128
2001	132	132
2002	135	135
2003	139	139
2004	145	145
2005	150	150
2006	153	153
2007	157	157
2008	161	161
2009	166	166
2010	173	171
2011	165	173
2012	160	173
2013	159	173
2014	156	173
2015	154	172
2016	151	171
2017	149	174
2018	146	165
2019	144	158
2020	143	
2021	142	148
2022	139	145
2023	137	143
2024	135	141
2025	134	138
2026	131	136
2027	129	134
2028	128	131
2029	127	129

6.2 Fichiers joints à ce rapport

6.2.1 Excel

A. Base de la ville de Gatineau mise en forme.xls : Base de données du secteur de Gatineau contenant toutes les conduites d'aqueduc, leurs caractéristiques intrinsèques, leurs bris par ordre chronologique, leurs dates de remplacement comme expliqué plus haut, etc. Nous incluons aussi, pour chaque conduite, des données sur le type de sol dans lequel elle est enfouie. Ces informations nous ont été acheminées suite à une commande envoyée à l'IRDA (Institut de recherche et de développement en agroenvironnement).

C'est cette base qui sera choisie comme entrée du modèle mathématique pour la prédiction des taux de bris.

B. AnalyseBrisGatineau81_2006INRS.xls : contient les feuilles suivantes, résumant toutes les étapes suivies pour la localisation des bris des conduites du secteur Gatineau :

- 1) **BrisFichierOriginal** : Fichier original des bris de 1981 à 2006, tel que reçu.
- 2) **NoCivique** : Fichier original des numéros civiques et des coordonnées géographiques.
- 3) **ChangeNomFusionOrthogINRS** : Toutes les adresses de bris qui ont été modifiées suite à la fusion des villes en 2001. Ce fichier contient aussi les changements apportés à l'orthographe des adresses de bris envoyés par la Ville.
- 4) **MiseEnFormeINRS** : Tous les bris (2 760) du fichier original, avec les adresses mises en forme par l'INRS, qu'on a pu localiser ou non avec des coordonnées géographiques. C'est à partir de ce fichier qu'on a identifié tous les bris avec des codes.
- 5) **BrisRécupCivExactEtCoinINRS** : Tous les bris (2 624) qu'on a pu localiser en se servant du fichier NoCivique et de Google[®] Map dans le cas des bris sur des coins de rues et avec des repères connus de la ville.
- 6) **RécupéréAprèsContactDompierre** : Tous les bris (46) qui étaient difficiles à localiser avec les adresses fournies dans le fichier original, mais qu'on a pu identifier grâce à la contribution de M. Dompierre de la Ville de Gatineau. Ces 46 bris se retrouvent aussi dans le fichier **BrisRécupCivExactEtCoinINRS**, puisqu'ils sont localisés avec des coordonnées géographiques.

- 7) **BrisNonLocalisésTOUS** : Tous les bris (136) qui n'ont pas pu être localisés à cause d'informations peu précises concernant leur adresse.
- 8) **FuiteJointureConduite81** : Tous les bris (2 425) des 2 624 qu'on a pu localiser et joindre aux conduites les plus proches.
- 9) **HistoriqueBris** : Fichier analysant l'historique de bris survenus dans le secteur de Gatineau entre 1981 et 2006.

6.2.2 ArcGIS

1. **BrisRecuperesCiv_Coin_81_2006INRS.shp** : La couche ArcGIS (fichier « shape ») de tous les bris qu'on a pu localiser par différents moyens (numéros civiques, repères connus de la ville, coins de rue, etc.).
2. **JointureBrisConduitesGAT81_2006.shp** : La couche ArcGIS (fichier « shape ») de tous les bris qui ont pu être joints avec les conduites les plus proches.
3. **AQUGatineauBrisées1981_2006.shp** : La couche ArcGIS (fichier « shape ») des conduites répertoriées comme brisées, selon la base 1981-2006.
4. **AQUGatineauModeleAvecEtSansBris81_2006** : La couche ArcGIS (fichier « shape ») de toutes les conduites du secteur de Gatineau, incluant les conduites brisées.
5. **ConduitesRemplaceesINRS.shp** : La couche ArcGIS (fichier « shape ») de toutes les conduites du secteur de Gatineau qu'on a jugé avoir été remplacées (dans Excel, ce sont les conduites contenant le mot INRS dans leurs noms). Cette couche est par contre utilisée seulement pour visualiser la répartition des conduites qui ont été remplacées dans la ville. Aucune autre information n'est disponible dans cette couche. De plus, une ligne de conduite remplacée dans cette couche peut contenir plusieurs tronçons de la base de données.