MODÉLISATION DES BRIS D'AQUEDUC ET ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LA VILLE DE ST−GEORGES

Rapport de recherche No R-1281 Mars 2012

MODÉLISATION DES BRIS D'AQUEDUC ET ANALYSE DES RÉSULTATS POUR LA VILLE DE ST-GEORGES

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^{o} 1281

Mars 2012

INRS
Université d'avant-garde

Canada

Québec

ISBN : 978-2-89146-744-5

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 de la ville de St-Georges et de tester l'impact de divers scénarios de remplacement sur le nombre de bris annuel de ce réseau.

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

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE xiii

1. Introduction 1

2. Description générale des modèles 3

2.1 Revue de la littérature 3

2.2 Principes généraux du modèle 6

3. Calage des modèles 9

3.1 Rappel 9

3.2 Résultats du calage du modèle *EEESt* 10

4. Choix du modèle : validation de la démarche 13

4.1 Application du modèle *EEEStx* 13

4.1.1 Utilisation de la longueur moyenne des classes de conduites 14

4.1.1.1 Groupe de diamètre 100 mm 14

4.1.1.2 Groupe de diamètre 150 mm 15

4.1.1.3 Groupe de diamètres 200-250 mm 16

4.1.1.4 Courbe de résultats additionnés des trois courbes (100, 150 et 200-250) 17

4.1.1.5 Simulation des classes regroupées 18

4.1.1.6 Comparaison classes additionnées et classes regroupées 19

4.1.2 Utilisation de la longueur individuelle de chaque conduite 19

4.1.3 Comparaison longueur variable et longueur moyenne 20

4.2 Comparaison entre les modèles *EEEStx* et *EEESt* 21

4.3 Influence du diamètre sur le nombre de bris 22

4.4 Conclusions 24

5. Prédiction de l'évolution des bris de conduites d'aqueduc de la ville de St-Georges 25

5.1 Modélisation du nombre de bris 25

5.1.1 Intervalle de confiance 25

5.1.2 Simulation de scénarios de remplacement 27
5.1.2.1 Scénarios basés sur l'âge des conduites 27
5.1.2.2 Scénarios basés sur le nombre de bris 28
5.1.3 Impact du type de remplacement sur le nombre de bris 29
5.2 Modélisation du taux de bris 30
5.2.1 Description du modèle 30
5.2.2 Calage du modèle 31
5.3 Modélisation de la longueur de conduites atteignant le taux de bris critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans 34
5.3.1 Évaluation du taux de remplacement sur le réseau théorique 35
5.4 Proposition de modèles simplifiés 38
5.4.1 Modèle de prédiction du nombre de bris 38
5.4.2 Modèle de prédiction de la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an 39
5.5 Taux de remplacement souhaitables pour la ville de St-Georges 41
5.6 Estimation des coûts 42
5.6.1 Coûts de remplacement 43
5.6.2 Coûts de réparation des bris 45
5.6.3 Coûts totaux 45
5.7 Conclusion 45
6. Création de la base de données des bris d'aqueduc de la ville de St Georges 49
6.1 Données initiales sur les bris 49
6.2 Distribution des bris sur les conduites 50
6.2.1 Fuites sans numéro civique 51
6.2.2 Fuites sur des coins de rue 53
6.2.3 Fuites avec numéro civique 54
6.2.4 Fuites avec description de lieu 54
6.2.5 Résultat de la localisation des bris 54

6.2.6 Les conduites remplacées 56
7. Estimation des remplacements de conduites de la ville de St-Georges 57
7.1 Préambule 57
7.2 Problématique 57
7.3 Travaux préliminaires 58
7.3.1 Conversion des fichiers AutoCAD en ArcGIS 58
7.4 Identification des conduites remplacées 59
7.4.1 Identification des conduites remplacées à partir des dates de bris sur Excel 59
7.4.2 Identification des conduites remplacées par analyse des années d'installation par secteur 59
7.4.3 Transcription dans Excel 60
7.5 Résultats 61
7.5.1 Analyse visuelle des résultats 61
7.5.2 Analyse statistique des résultats 62
7.6 Problèmes rencontrés : nouveaux quartiers 64
8. Références bibliographiques 65
9. ANNEXES 69
9.1 Tableaux des bris simulés avec différents scénarios de remplacement 71
9.2 Développement du modèle *EEEStx* 79
9.3 Fichiers joints à ce rapport 83
9.3.1 Excel 83
9.3.2 ArcGIS 83
9.4 Résultat d'analyse par tomodensitométrie d'un tuyau d'eau potable 84

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Résultats de la simulation des bris cumulés. 11
Figure 2 : Résultats de la simulation (modèle *EEESt*) comparés avec les observations. 11
Figure 3 : Résultats pour le groupe de diamètre 100 mm, de longueur moyenne de 145 m. 14
Figure 4 : Résultats pour le groupe de diamètre 150 mm, de longueur moyenne de 150 m. 15
Figure 5 : Résultats pour le groupe de diamètre 200 et 250 mm, de longueur moyenne de 158 m. 16
Figure 6 : Résultats additionnés des trois courbes (100, 150 et 200-250 mm). 17
Figure 7 : Résultats de simulation pour les conduites regroupées en une seule classe. 18
Figure 8 : Comparaison des résultats entre classes additionnées et conduites regroupées. 19
Figure 9 : Résultats pour la classe de diamètre 150 mm et la longueur variable. 20
Figure 10 : Comparaison des résultats obtenus avec la longueur variable et la longueur moyenne pour la classe de 150 mm. 21
Figure 11 : Comparaison du nombre de bris simulés par les modèles *EEEStx* et *EEESt.* 22
Figure 12 : Influence du diamètre sur le nombre de bris. 23
Figure 13 : Probabilité de bris en fonction de l'âge d'une conduite pour différentes classes de diamètre et pour des longueurs de 200 et 500 m (dans la légende, le premier nombre représente le diamètre, en mm, et le second nombre représente la longueur, en m). 24
Figure 14 : Courbes de l'intervalle de confiance pour le nombre de bris simulé. 26
Figure 15 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur l'âge. 27
Figure 16 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur le nombre de bris. 28
Figure 17 : Comparaison de deux scénarios de remplacement pour un remplacement annuel de 2 %. 29
Figure 18 : Taux de bris moyen observé en fonction de l'âge. 30
Figure 19 : Taux de bris moyen simulé en fonction de l'âge et comparaison avec les observations. 31
Figure 20 : Nombre de bris simulé avec le modèle de taux de bris en fonction de l'âge et comparaison avec les observations. 32
Figure 21 : Nombre de bris simulé par les modèles *EEESt* et *TB* et comparaison avec les observations. 33

Figure 22 : Comparaison entre les résultats du modèle *EEESt* global et les bris du réseau théorique. 35
Figure 23 : Comparaison entre le remplacement constant et celui des conduites critiques à chaque année. 38
Figure 24 : Comparaison entre le modèle *EEESt* et la régression linéaire. 39
Figure 25 : Illustration des régressions linéaire et exponentielle de la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans. 40
Figure 26 : Taux annuel de remplacement estimé de 1996 à 2006. 42
Figure 27 : Coûts annuels pour 0,5 % de remplacement. 44
Figure 28 : Extrait du fichier ayant servi à faire la jointure entre les fuites et les conduites. 51
Figure 29 : Exemple de la carte de la ville en fichier AutoCAD. 52
Figure 30 : Exemple du fichier AutoCAD du plan d'intervention. 52
Figure 31 : Exemple de recherche d'une rue sur GoogleMaps. 53
Figure 32 : Historique de bris de la ville de St-Georges de 1987 à 2008. 55
Figure 33 : Nombre de bris enregistrés à St-Georges de 1987 à 2008, par carreau de 250 m par 250 m. 56
Figure 34 : Année d'installation des conduites de la ville de St-Georges, affichage par ArcGIS. 58
Figure 35 : Exemple de repérage visuel des conduites remplacées. 60
Figure 36 : Répartition des conduites remplacées de la ville de St-Georges. 62
Figure 37 : Linéaire de réseau cumulé. 63
Figure 38 : Pourcentage du linéaire de réseau remplacé à chaque année. 63
Figure 39 : Coupe transversale de la numérisation d'un tuyau de la Ville de St-Georges. 85
Figure 40 : Illustration du principe du déroulement du tuyau pour la création de l'Image-Plan. 86
Figure 41 : Exemple de l'Image-Plan pour le tuyau-échantillon de St-Georges. 87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Intervalle de confiance à 95 % pour le nombre de bris simulé. 26
Tableau 2 : Nombre de bris simulé pour les scénarios basés sur l'âge. 28
Tableau 3 : Nombre de bris simulé pour le scénario basé sur le nombre de bris. 29
Tableau 4 : Nombre de bris simulé de 1987 à 2033. 33
Tableau 5 : Longueur des 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. 36
Tableau 6 : Nombre de bris simulé de 2007 à 2027. 37
Tableau 7 : Coûts par mètre de conduite en fonction du diamètre. 43
Tableau 8 : Coûts de remplacement annuels moyens de 2007 à 2027 (en dollars CAN), en fonction du taux de remplacement. 44
Tableau 9 : Aperçu de la table originale des fuites de la ville de St-Georges. 49
Tableau 10 : Extrait du plan d'intervention de la ville de St Georges. 50
Tableau 11. Exemple du doublement d'une conduite. 61
Tableau 12 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 0 % de remplacement. 72
Tableau 13 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 0,5 % de remplacement. 73
Tableau 14 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 1 % de remplacement. 74
Tableau 15 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 1,5 % de remplacement. 75
Tableau 16 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 2 % de remplacement. 76
Tableau 17 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 2,5 % de remplacement. 77
Tableau 18 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 3 % de remplacement. 78

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 St-Georges. 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 2006; et 2) une table des fuites répertoriées sur le réseau de 1987 à 2008. Ces bases de données ont été remaniées, avec le support du personnel de la Ville, tel que décrit au chapitre 6 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 aux chapitres 3 à 5 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 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 2008 à 2033. Ainsi, on prévoit que si aucune conduite n'était remplacée ni ajoutée sur le réseau d'ici 2033, le nombre de bris annuel total sur le réseau passerait de 72 en 2007 à 125 en 2033. 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 2006. Selon les analyses effectuées, il faudrait remplacer 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 2006 (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 2027. 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 3,0 % 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 0,4 % 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 5 de ce rapport, le coût total sur 20 ans de ce scénario est de 30 millions de dollars, soit 13 M $ pour les remplacements de conduites et 17 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 2 %, son coût total estimé sur 20 ans est de 56 millions de dollars, soit 42 M $ pour les remplacements et 14 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 39 % 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 St-Georges sont analysées dans ce rapport.

Le chapitre suivant de ce rapport (Chapitre 2) présente une revue des modèles de bris de conduites d'aqueduc ainsi que les principes de base du modèle appliqué dans le cadre de cette étude. Le chapitre 3 expose la méthode retenue pour adapter le modèle à un réseau précis. Divers tests réalisés en vue de choisir le modèle pour la prédiction des bris sont présentés au chapitre 4, tandis que les applications pour le réseau de St-Georges apparaissent au chapitre 5. Le chapitre 6 concerne la création de la base de données des bris des conduites d'aqueduc de St-Georges survenus entre les années 1987 et 2009, qui a été utilisée pour construire les différents modèles de prédiction. Quant au chapitre 7, il résume les étapes suivies pour l'estimation des conduites d'aqueduc remplacées à St-Georges, 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, la démonstration des équations du modèle, des détails concernant les fichiers joints à ce document ainsi que les résultats de l'analyse en laboratoire d'un tuyau d'eau potable en fonte fourni par la Ville de St-Georges.

2. Description générale des modèles

Ce chapitre présente tout d'abord, à la section 2.1, une revue de la littérature scientifique concernant les modèles de bris de conduites d'aqueduc. Les principes de base des modèles utilisés dans le cadre de la présente étude sont ensuite introduits à la section 2.2

2.1 Revue de la littérature

La simulation de l'évolution de l'état structural d'un réseau d'aqueduc fait appel à la connaissance du comportement historique des conduites. Des méthodes de mesure *in situ* permettent de mesurer l'état actuel d'une conduite et d'en déduire son niveau de détérioration. Ces méthodes ne peuvent cependant être appliquées qu'à un nombre restreint de conduites et ne donnent pas d'information sur l'évolution temporelle du vieillissement des conduites.

On sait cependant que le vieillissement des conduites se traduit par une fragilisation de leur structure, attribuable en grande partie à la corrosion des parois (Schock, 1990). Soumises aux différentes forces agissant sur elles (Eisenbeis, 1994), les parois affaiblies sont susceptibles de subir des bris, ce qui se traduit par une fuite d'eau qui, lorsque repérée, est réparée. Cet historique d'interventions constitue une bonne indication de l'état actuel des conduites et de leur vieillissement.

Depuis quelques années, certaines municipalités du Québec ont enregistré ces interventions sur les conduites d'aqueduc, ce qui constitue une base historique de données de bris. En utilisant ces données, il est possible de simuler l'évolution des bris et ainsi de prédire l'évolution du réseau en matière de bris (Villeneuve *et al*., 1998). Une revue exhaustive des modèles permettant de prédire cette évolution a été réalisée par Villeneuve *et al*., en 1998, et par Geneviève Pelletier en 2000. Une revue importante des différents modèles utilisés pour évaluer la détérioration structurale des conduites a également été réalisée en 2001 par Kleiner et Rajani. Ces auteurs présentent une excellente synthèse des principaux modèles statistiques utilisés au cours des vingt dernières années pour la modélisation des bris. Dans un second article, ces mêmes auteurs (Rajani et Kleiner, 2001) font une revue des modèles mécanistiques à base physique. Ce denier type de modèle tente de faire le lien entre les

différentes forces agissant sur les conduites et la détérioration causée par ces forces. On y classe ces modèles en deux catégories : déterministes et probabilistes. Ces deux articles (Kleiner et Rajani, 2001; et Rajani et Klenier, 2001) constituent une excellente revue de la littérature sur la modélisation de l'évolution du vieillissement des conduites d'aqueduc. Un retour en arrière sur toutes les méthodes, approches ou développements réalisés avant 2001 nous apparaît donc peu pertinent dans le cadre de la présente étude, puisque le lecteur intéressé pourra consulter à ce sujet les deux articles mentionnés précédemment.

Dans le cadre de l'étude de Villeneuve *et al*. (1998), l'analyse de survie a été utilisée pour modéliser le temps entre les bris successifs. Cependant, pour utiliser l'analyse de survie de manière classique, on doit connaître l'historique complet des bris, soit le temps écoulé depuis l'installation de la conduite jusqu'au premier bris, le temps entre le premier et le deuxième bris, et ainsi de suite. De plus, il a été démontré que la distribution statistique du temps entre deux bris successifs était différente de celle du temps entre le moment de l'installation de la conduite et le premier bris (Andreou *et al*., 1987; Clark *et al*., 1982; Clark *et al*., 1988). Ainsi, un modèle statistique doit être utilisé pour représenter chacun de ces intervalles (fonction de distribution différente ou paramètres différents). Les modèles statistiques les plus fréquemment utilisés pour représenter le temps de survie entre deux bris (ou entre la date d'installation et le premier bris) sont la distribution exponentielle et celle de Weibull (Andreou *et al*., 1987; Einsenbeis, 1994).

À notre connaissance, aucune municipalité du Québec ne dispose d'un historique de bris contenant tous les bris survenus depuis l'installation des premières conduites (ce qui est particulièrement évident pour les villes dont les réseaux sont âgés). Pour pallier cette problématique de courts historiques de bris par rapport à l'âge des réseaux, une méthodologie a été développée par Pelletier et Mailhot (voir les détails dans Mailhot *et al*., 2000; Pelletier, 2000; Villeneuve *et al*., 1998). Ces derniers ont développé une approche de modélisation statistique prenant en compte à la fois la période où les bris n'ont pas été enregistrés et celle où les bris ont été enregistrés. C'est la première fois que l'on voit apparaître cette approche méthodologique dans la littérature. Des études de cas ont été réalisées, démontrant la pertinence et la validité de cette méthodologie (Pelletier *et al*., 2003). Cette approche a aussi été utilisée pour établir une démarche optimale de remplacement des conduites (Mailhot *et al*., 2003).

Plusieurs modèles ont également été développés pour prendre en compte les différents facteurs influençant le vieillissement des conduites. En plus de l'âge des conduites, on tente de prendre en compte d'autres variables telles que la pression, la température, l'humidité du sol, le diamètre des conduites, la longueur des conduites et le matériau des conduites (Berardi *et al*., 2008; Davis *et al*., 2004; Davis *et al*. 2008; Hong *et al*., 2006; Hu et Hubble, 2007; Kleiner et Rajani, 2001; Kleiner *et al*., 2007; Kleiner *et al*., 2009; Rajani et Kleiner, 2001 Su, 2007; Vanrenterghem-Raven, 2007; Wang *et al*., 2009; Yamijala *et al*., 2009).

Pour pouvoir utiliser ces derniers modèles, ont doit disposer de données fiables, tel que le soulignaient déjà en 1989 Clark *et al*., c'est-à-dire d'une base où les données ont été colligées de façon précise en ce qui a trait aux différentes variables que l'on veut prendre en compte pour évaluer l'état structural des conduites. Les bases de données que nous avons récoltées au cours de ce projet ne contiennent pas assez d'information par rapport à certaines de ces variables. Il nous apparaît inapproprié d'entreprendre une modélisation où l'on prendrait en compte des données soit inexactes ou soit incomplètes. Comme le soulignaient d'ailleurs Berardi *et al*. (2008), les efforts déployés pour introduire des techniques d'analyse complexes deviennent futiles face à des données non disponibles ou de piètre qualité.

Dans la présente étude, nous nous en tiendrons donc à l'approche préconisée par Mailhot *et al*. (2000). Cette décision nous apparaît d'autant plus pertinente suite à la comparaison réalisée par Alvisi et Franchini en 2010. Ces auteurs ont comparé le modèle de Mailhot *et al*. (2000) et celui proposé par Le Gat et Eisenbeis (2000). On doit noter cependant une différence significative dans les deux approches. Le Gat et Eisenbeis (2000) modélisent l'intervalle de temps entre les bris pendant la période d'observation. Bien qu'ils prennent en compte des covariables explicatives, ils ne font pas de distinction entre le premier bris, le deuxième bris et les bris successifs. L'approche proposée par Mailhot *et al*. (2000) tient compte de l'ordre d'arrivée des bris. Elle est en ce sens plus conforme aux observations de Clark *et al*. (1982; 1988) et de Andreou *et al*. (1987). Dans la présente étude, nous retiendrons donc l'approche de Mailhot *et al*. (2000), en modifiant les équations du modèle et en y intégrant des covariables selon l'approche proposée par Kalbfleisch et Prentice (2003).

2.2 Principes généraux du modèle

Le modèle de bris développé dans l'étude de 1998 (voir Villeneuve *et al*., 1998) utilisait des distributions exponentielles et/ou de Weibull qui ne dépendaient que du temps t. Des essais préliminaires ont montré que la distribution exponentielle permettait de bien reproduire les historiques de bris. C'est donc celle que nous avons retenue dans cette étude pour simuler l'évolution temporelle des bris d'un réseau d'aqueduc. On retrouve également dans Kalbfleisch (2003) une généralisation des distributions exponentielle et de Weibull qui permet de tenir compte, en plus du temps t, de covariables, notées x (ex. : diamètre, longueur, matériau, etc.). Nous avons utilisé cette généralisation pour l'appliquer à la distribution exponentielle.

Pour la distribution exponentielle qui ne tient compte que du temps t, la fonction de survie est donnée par :

$$S(t) = e^{-\lambda t} \tag{1}$$

où λ, la fonction de risque, est une constante strictement positive. Rappelons que la fonction de survie donne la probabilité que le temps entre deux bris, ou le temps entre la date d'installation de la conduite et le premier bris, soit supérieur à t. Le développement du modèle de bris utilisant la fonction de survie de l'équation 1, que nous appellerons distribution *St*, est donné en annexe (Section 9.2).

La fonction précédente, *St*, ne tient compte que du temps pour calculer la probabilité d'occurrence d'un bris. La fonction qui tient d'autres covariables sera appelée *Stx*. La différence entre la distribution exponentielle *St* et la distribution exponentielle généralisée *Stx* se situe au niveau de leur fonction de risque. En effet, pour la distribution *St*, la fonction de risque est constante et est égale à λ, alors que pour la distribution *Stx*, cette fonction de risque n'est plus constante, mais dépend des covariables x.

Cette fonction de risque s'écrit $\lambda(x) = \lambda e^{x \cdot \beta}$ où λ est la constante correspondant à la fonction de risque de la distribution *St*, x est le vecteur des covariables et β est un vecteur de

paramètres de même taille que x . On peut poser comme hypothèse que x et β sont indépendants du temps. Ainsi, la fonction de survie de la distribution *Stx* est donnée par :

$$S(t, \boldsymbol{x}) = e^{-\lambda t e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \tag{2}$$

Le développement du modèle de bris ***EEEStx,*** utilisant la distribution *Stx,* est donné en annexe (Section 9.2). Quant à celui utilisant la distribution *St* (le modèle ***EEESt***), il est un cas particulier du modèle ***EEEStx*** où le vecteur des paramètres β est égal à zéro**.**

Dans les prochains chapitres de ce rapport, nous comparerons les résultats obtenus avec ces deux types de modèles afin de choisir quel modèle adopter pour l'étude.

3. Calage des modèles

3.1 Rappel

Le modèle mathématique utilisé dans 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 premier modèle choisi pour *St* (c.-à-d. la fonction de survie qui ne dépend que du temps) est celui selon lequel : 1) le temps d'arrivée du premier bris est modélisé par une distribution exponentielle; 2) le temps entre le premier et le deuxième bris par une autre distribution exponentielle; et 3) celui entre les bris subséquents par une troisième distribution exponentielle; d'où l'appellation « modèle Exponentiel-Exponentiel-Exponentiel (***EEESt***) ».

Il est démontré en annexe (Section 9.2) 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 :

$$\mu(Ta) = \left(\frac{\kappa_3}{\kappa_2} - 1\right)\left(\frac{\kappa_1}{\kappa_2 - \kappa_1}\right)\left(-e^{-\kappa_2 Ta} - e^{-\kappa_1 Ta}\right) + \kappa_3 Ta + \left(\frac{\kappa_3}{\kappa_2} + \frac{\kappa_3}{\kappa_1} - 2\right)\left(e^{-\kappa_1 Ta} - 1\right) \quad (3)$$

où $\mu(Ta)$ est le nombre de bris moyen cumulé entre la date d'installation du tronçon et l'année d'observation *Ta* 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 :

$$\overline{n}(A) = \sum_{i=1}^{n_t} \mu_i(T_a) \tag{4}$$

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. Ainsi, la somme des écarts au carré entre le nombre de bris simulé par année et le nombre de bris observé par année a été minimisée. Il s'agit donc de calculer l'expression suivante :

$$\min_{\{p\geq 0\}} \left\{ f(p) = \sum_{i=1}^{nbannée} \left[\overline{n}(A_i) - nbobs_i \right]^2 \right\} \tag{5}$$

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 $\overline{n}(A_i)$ et $nbobs_i$ représentent respectivement le nombre total de bris simulé et le nombre total de bris observé à l'année A_i. Les résultats obtenus avec cette méthode pour St-Georges sont présentés aux sections suivantes.

3.2 Résultats du calage du modèle *EEESt*

Pour le calage du modèle ***EEESt***, les bris survenus sur les conduites de la ville de St-Georges, au cours des années 1987 à 2008, ont été utilisés. En évaluant l'expression donnée par l'équation 5, 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 la ville de St-Georges, ces valeurs sont κ_1 = 0,00683; κ_2 = 0,39421; et κ_3 = 0,38074.

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 1987 à 2008), 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 pour le modèle ***EEESt***, est représentée à la Figure 2, où sont aussi donnés, à titre de comparaison, les bris observés (points rouges).

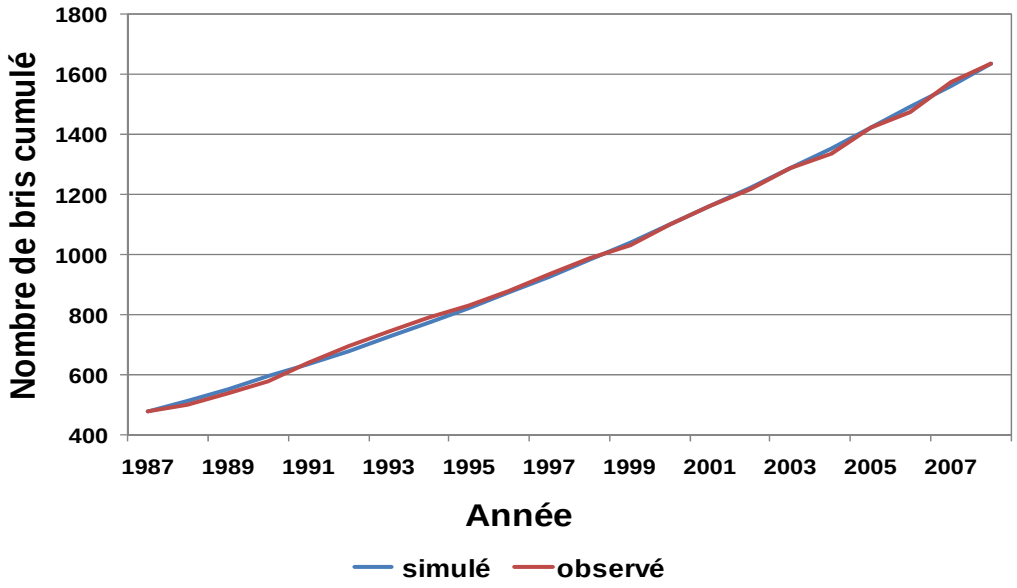


Figure 1 : Résultats de la simulation des bris cumulés.

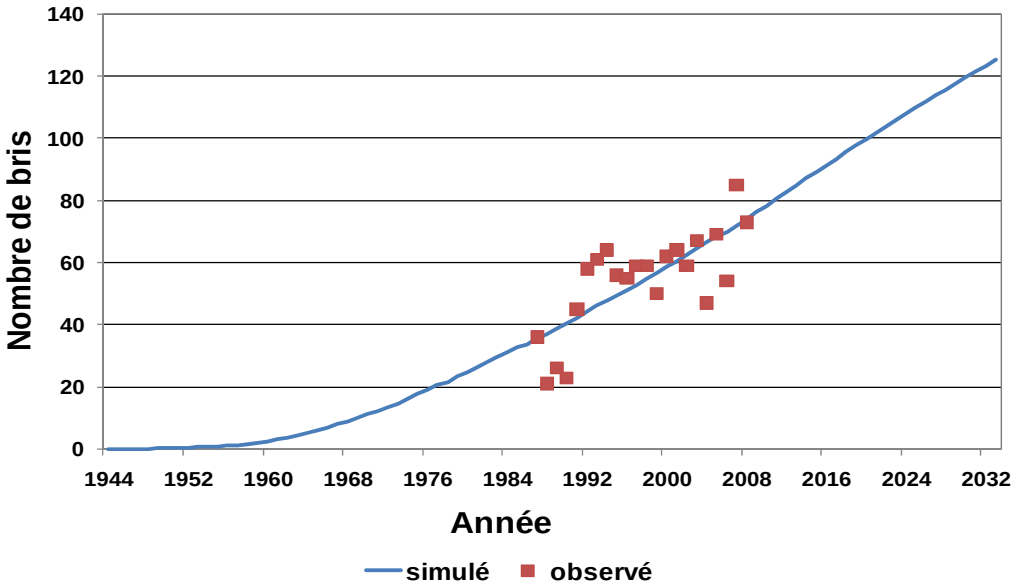


Figure 2 : Résultats de la simulation (modèle *EEESt*) comparés avec les observations.

On peut ainsi constater la capacité du modèle ***EEESt*** à bien représenter l'évolution des bris du réseau. Ces résultats montrent aussi que la méthode des moindres carrés permet de bien définir les paramètres du modèle. Afin de déterminer lequel des deux modèles, ***EEESt*** sans covariables ou ***EEEStx*** avec covariables, est le plus approprié pour notre étude, une comparaison des résultats obtenus avec les deux modèles est présentée au chapitre suivant.

4. Choix du modèle : validation de la démarche

Les modèles ***EEESt*** et ***EEEStx*** sont appliqués, dans ce chapitre, aux données de la municipalité de Saint-Georges. Les résultats obtenus seront comparés entre eux.

À la section 4.1, nous allons tout d'abord analyser les résultats du modèle ***EEEStx*** afin de déterminer les covariables à conserver (ou non) dans le modèle. Les covariables prises en compte sont la longueur, x_1 et le diamètre, x_2, de chaque conduite.

Dans un premier temps, les conduites seront divisées en trois groupes de diamètres (100 m, 150 mm et 200-250 mm) et un jeu de paramètres distincts $\{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \beta_1, \beta_2\}$ sera utilisé pour chacun des groupes. Pour la première partie de cette analyse (Section 4.1.2), la longueur considérée est la même pour chaque conduite d'un même groupe; elle est égale à la longueur moyenne des conduites du groupe. Pour la seconde partie (Section 4.1.2), la longueur réelle de chaque conduite est prise en compte.

À la section 4.2, les résultats des modèles ***EEESt*** et ***EEEStx*** seront comparés. Pour cette comparaison, toutes les conduites du réseau d'aqueduc dont le diamètre est supérieur où égal à 100 mm seront regroupées. L'âge de chaque conduite sera pris en compte dans les deux modèles, de même que la longueur et le diamètre des conduites dans le modèle ***EEEStx***.

4.1 Application du modèle *EEEStx*

Pour appliquer le modèle ***EEEStx*** nous utilisons deux covariables, soit le diamètre et la longueur des conduites. En analysant la base de données de St-Georges, on peut établir trois classes de diamètre ayant un nombre représentatif de conduites. Dans un premier temps, on utilisera la longueur moyenne de chaque classe (Section 4.1.1) et dans un deuxième temps, on tiendra compte de la longueur de chaque conduite (Section 4.1.2).

4.1.1 Utilisation de la longueur moyenne des classes de conduites

Pour cette analyse, les conduites du réseau sont subdivisées en groupes de diamètres. La valeur de la covariable « longueur » est fixée à la longueur moyenne des conduites de chaque groupe. Les groupes de diamètres considérés sont 100 mm, 150 mm et 200-250 mm.

4.1.1.1 Groupe de diamètre 100 mm

On retrouve, à la Figure 3, les résultats obtenus pour la classe de diamètre 100 mm et de longueur moyenne de 145 m.

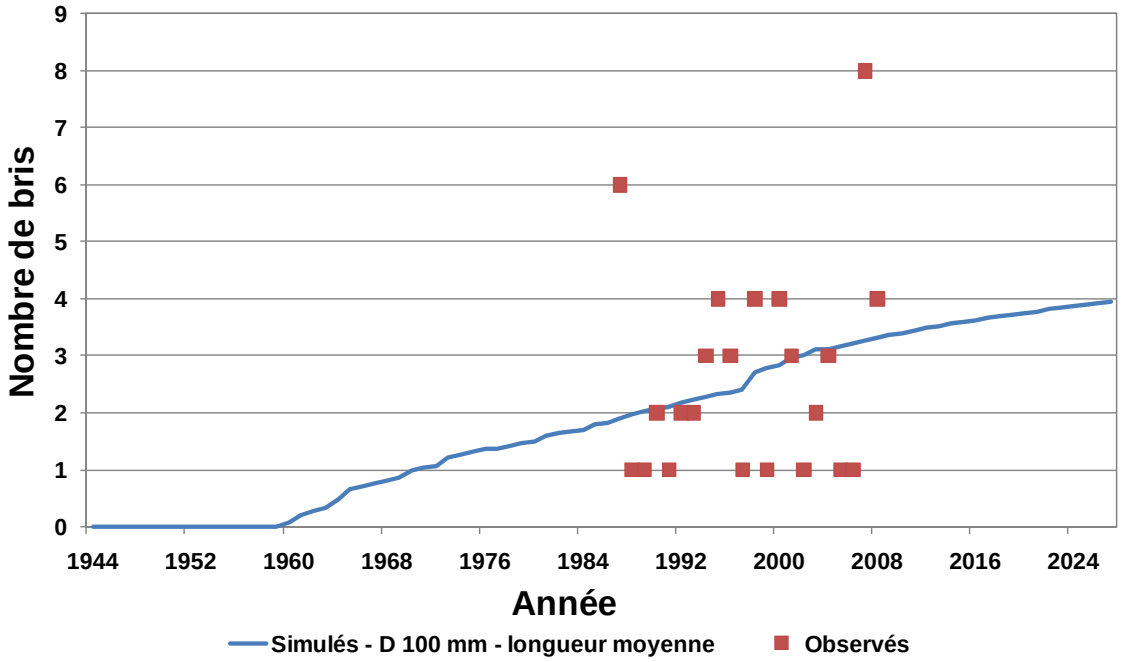


Figure 3 : Résultats pour le groupe de diamètre 100 mm, de longueur moyenne de 145 m.

4.1.1.2 Groupe de diamètre 150 mm

On retrouve, à la Figure 4, les résultats obtenus pour la classe de diamètre 150 mm et de longueur moyenne de 150 m.

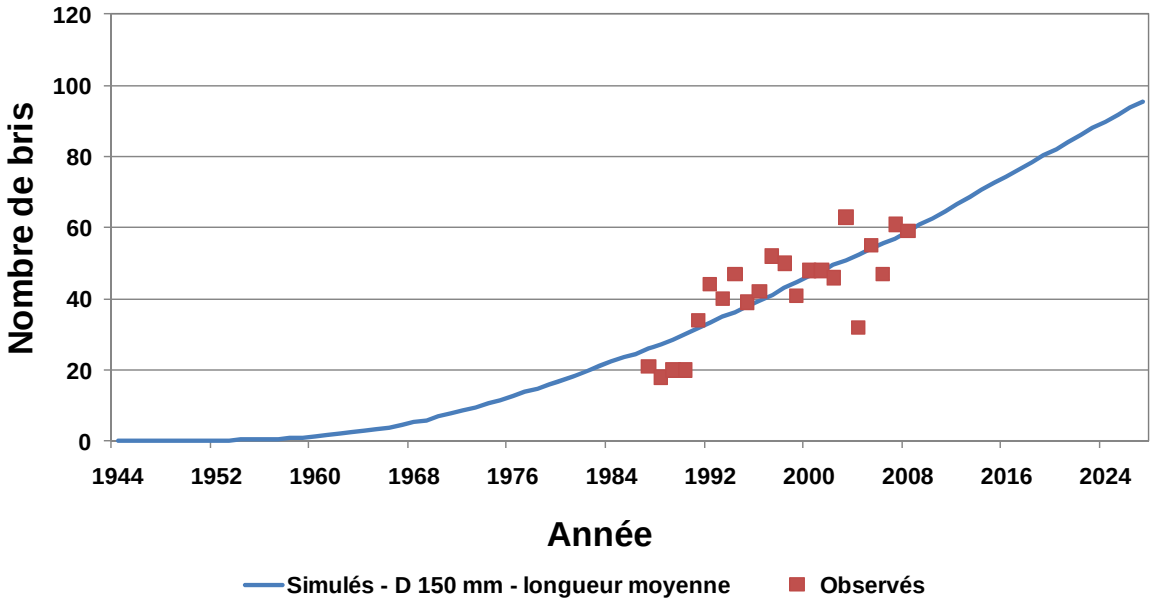


Figure 4 : Résultats pour le groupe de diamètre 150 mm, de longueur moyenne de 150 m.

4.1.1.3 Groupe de diamètres 200-250 mm

On retrouve, à la Figure 5, les résultats obtenus pour la classe de diamètre 200 et 250 mm et de longueur moyenne de 158 m.

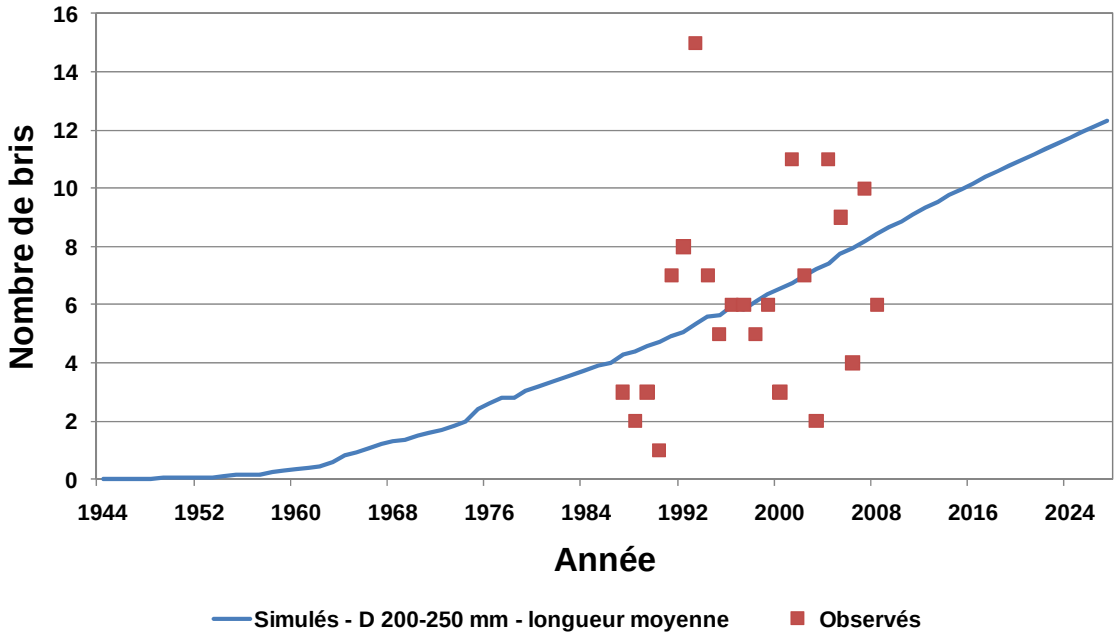


Figure 5 : Résultats pour le groupe de diamètre 200 et 250 mm, de longueur moyenne de 158 m.

4.1.1.4 Courbe de résultats additionnés des trois courbes (100, 150 et 200-250)

On retrouve, à la Figure 6, les résultats obtenus pour les résultats additionnés des trois courbes (100, 150 et 200-250 mm).

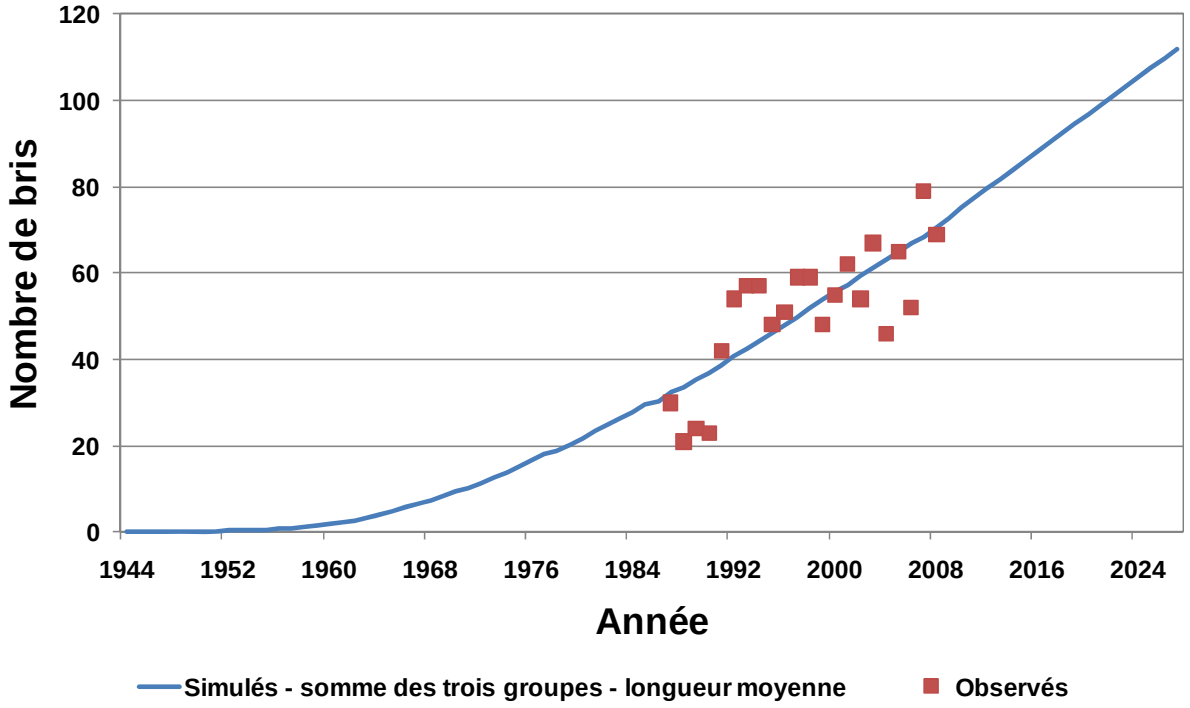


Figure 6 : Résultats additionnés des trois courbes (100, 150 et 200-250 mm).

4.1.1.5 Simulation des classes regroupées

Pour cette simulation, toutes les conduites de 100 mm et plus ont été regroupées et un seul jeu de paramètres $\{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \beta_1, \beta_2\}$ a été déterminé. Une longueur moyenne de 152 m a été prise en compte. Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 7.

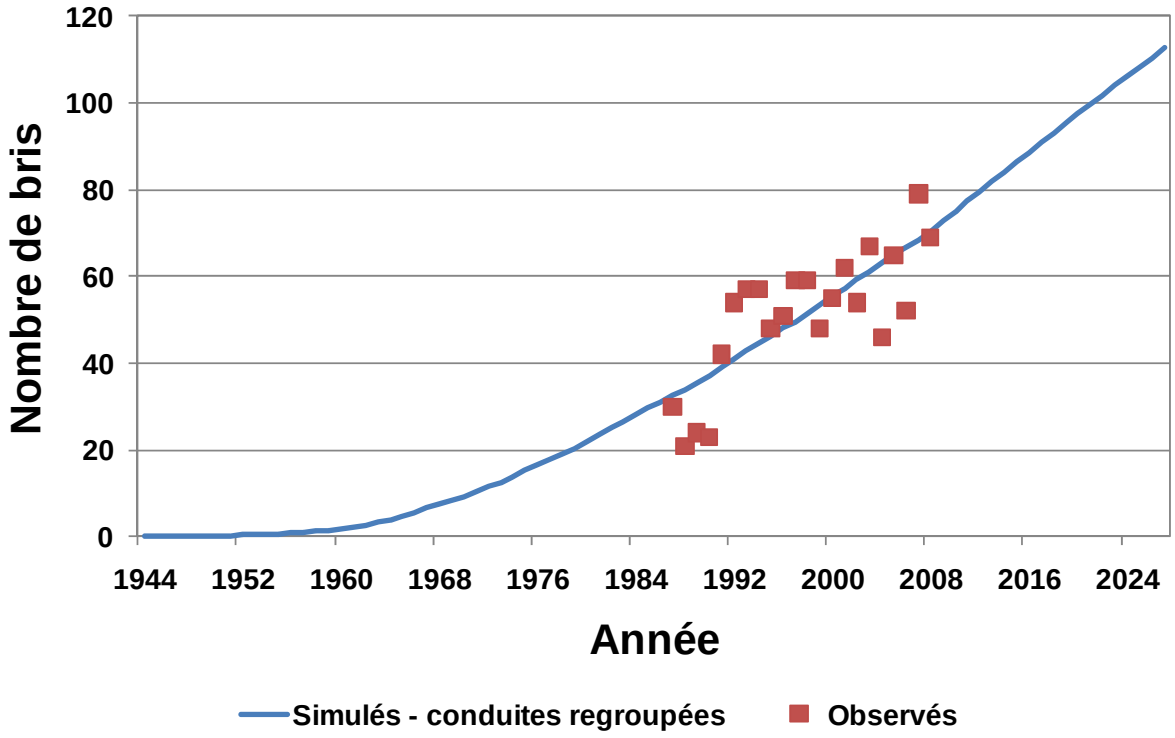


Figure 7 : Résultats de simulation pour les conduites regroupées en une seule classe.

4.1.1.6 Comparaison classes additionnées et classes regroupées

On retrouve, à la Figure 8, la comparaison des courbes obtenues, avec une longueur moyenne, pour : 1) les classes de diamètres additionnées; et 2) les conduites regroupées. On constate que ces deux courbes sont confondues. Ceci signifie que lorsqu'on s'intéresse à l'évolution globale d'un réseau, c'est-à-dire au nombre de bris total sur un réseau, les résultats sont sensiblement les mêmes si l'on travaille par classes de diamètre ou en regroupant toutes les conduites.

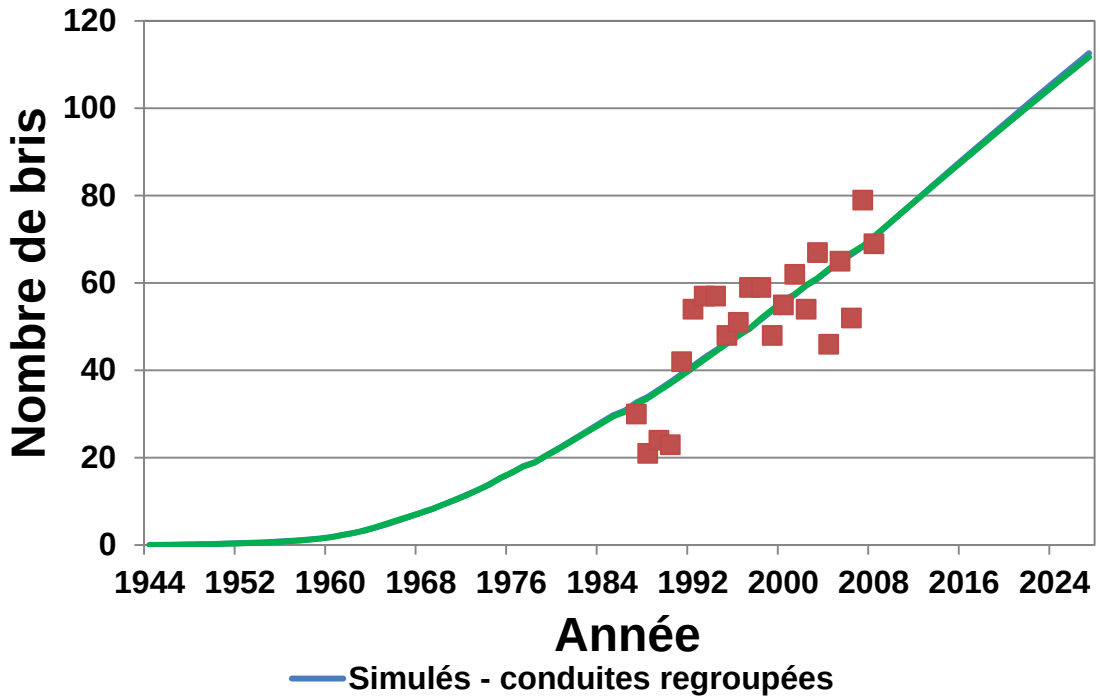


Figure 8 : Comparaison des résultats entre classes additionnées et conduites regroupées.

4.1.2 Utilisation de la longueur individuelle de chaque conduite

Pour cette analyse, les conduites du réseau sont encore subdivisées en groupes de diamètres. Cependant, la valeur de la covariable « longueur » est fixée, pour chaque conduite, à sa longueur réelle. Les groupes de diamètres considérés sont 100 mm, 150 mm et 200-250 mm.

Étant donné que la classe de diamètre 150 mm est la classe la plus importante de la base de données (les conduites de cette la classe représentent plus de 60 % des conduites du réseau),

nous n'utiliserons que cette classe de conduites pour comparer l'impact de la longueur. On retrouve, à la Figure 9, les résultats du modèle ***EEEStx*** obtenus pour cette classe de diamètre.

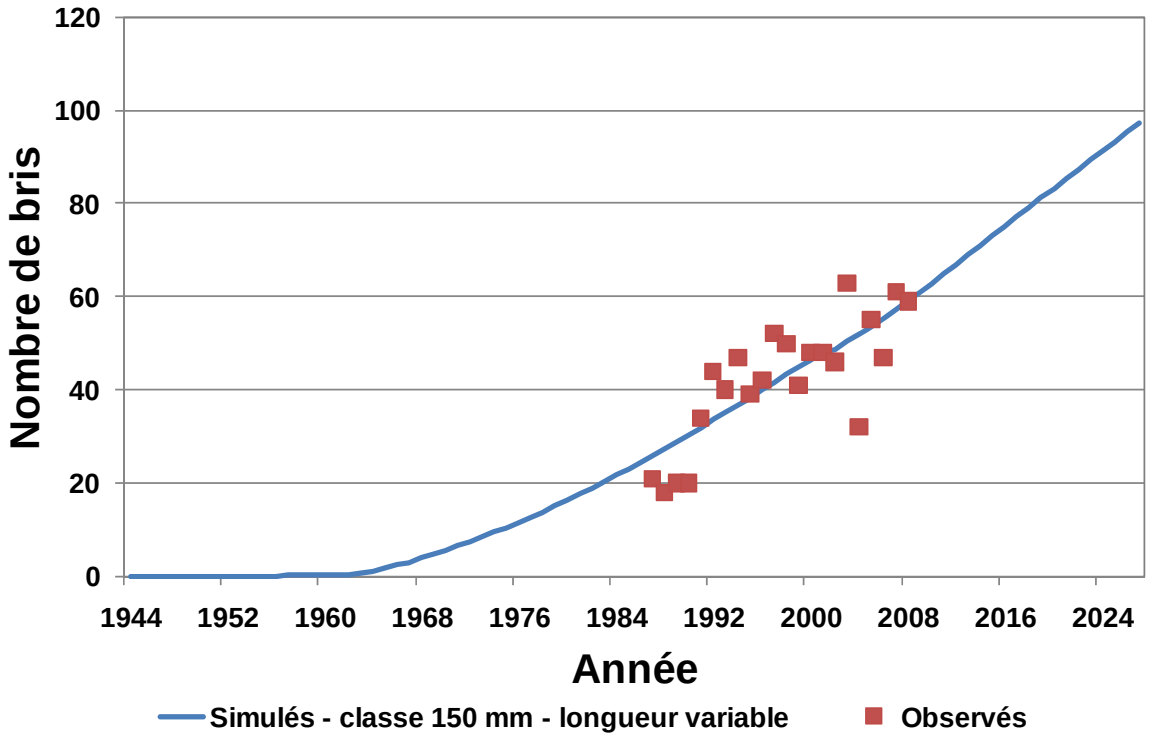


Figure 9 : Résultats pour la classe de diamètre 150 mm et la longueur variable.

4.1.3 Comparaison longueur variable et longueur moyenne

La Figure 10 compare les résultats du modèle ***EEEStx*** obtenus pour la classe de diamètre 150 mm en considérant : 1) la longueur de chaque conduite (résultats de la Figure 9); et 2) la longueur moyenne des conduites, soit 150 m. On constate sur cette figure qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux simulations. Ceci implique que, lorsqu'on s'intéresse à l'évolution globale d'un réseau, c'est-à-dire au nombre de bris total sur un réseau, il n'est pas nécessaire de tenir compte des différentes longueurs de conduites.

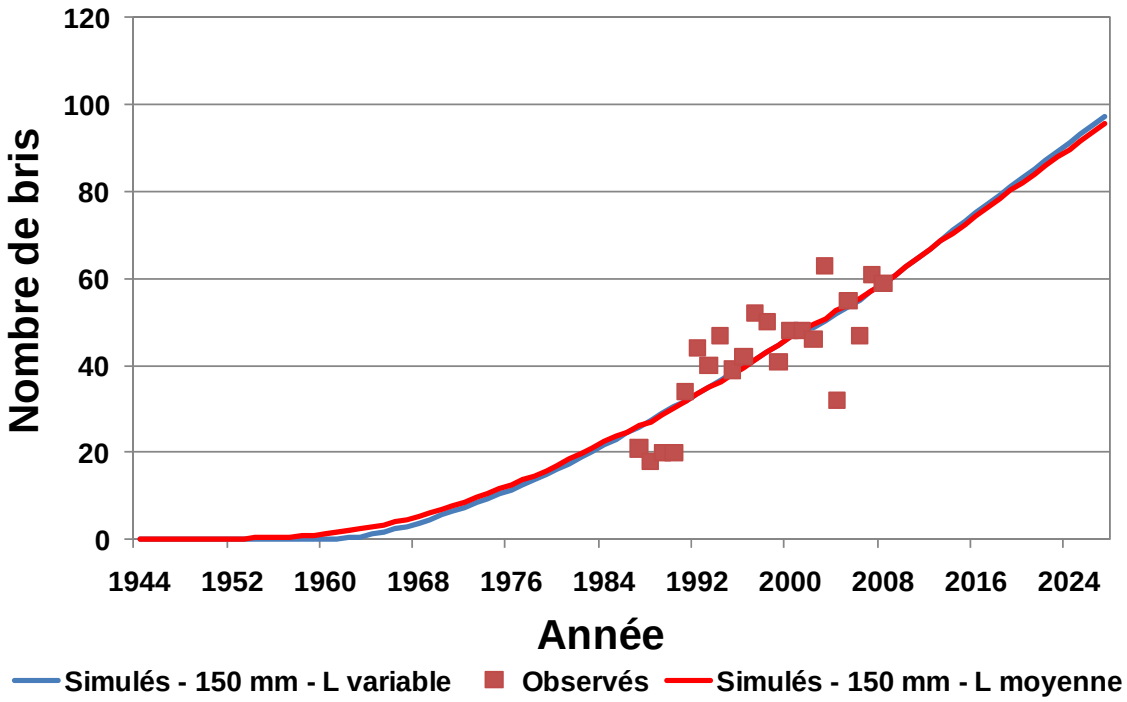


Figure 10 : Comparaison des résultats obtenus avec la longueur variable et la longueur moyenne pour la classe de 150 mm.

4.2 Comparaison entre les modèles *EEEStx* et *EEESt*

Pour cette comparaison, nous avons donc réalisé deux simulations. Pour ces simulations, nous n'avons retenu que les conduites de diamètre 100 mm et plus de la base de données de St-Georges. Les conduites de diamètre inférieur n'ont pas été prises en compte puisqu'elles sont peu nombreuses et, par conséquent, le modèle ***EEEStx*** n'a pas pu être calé pour ces conduites. Pour la simulation avec le modèle ***EEEStx***, nous avons tenu compte de l'âge, du diamètre et de la longueur de chaque conduite. Évidemment, pour le modèle ***EEESt***, nous n'avons tenu compte que de l'âge des conduites.

On retrouve, à la Figure 11, les résultats obtenus pour ces deux simulations. On se doit de constater, sur cette figure, que les résultats des simulations pour les modèles ***EEEStx*** et ***EEESt*** sont confondus. Ceci implique que le diamètre et la longueur des conduites n'ont pas, à notre avis, un impact significatif sur la modélisation. Selon ces résultats, lorsqu'on s'intéresse à l'évolution globale d'un réseau, c'est-à-dire au nombre de bris total sur un réseau, il ne serait pas nécessaire de tenir compte de la longueur ni du diamètre des conduites.

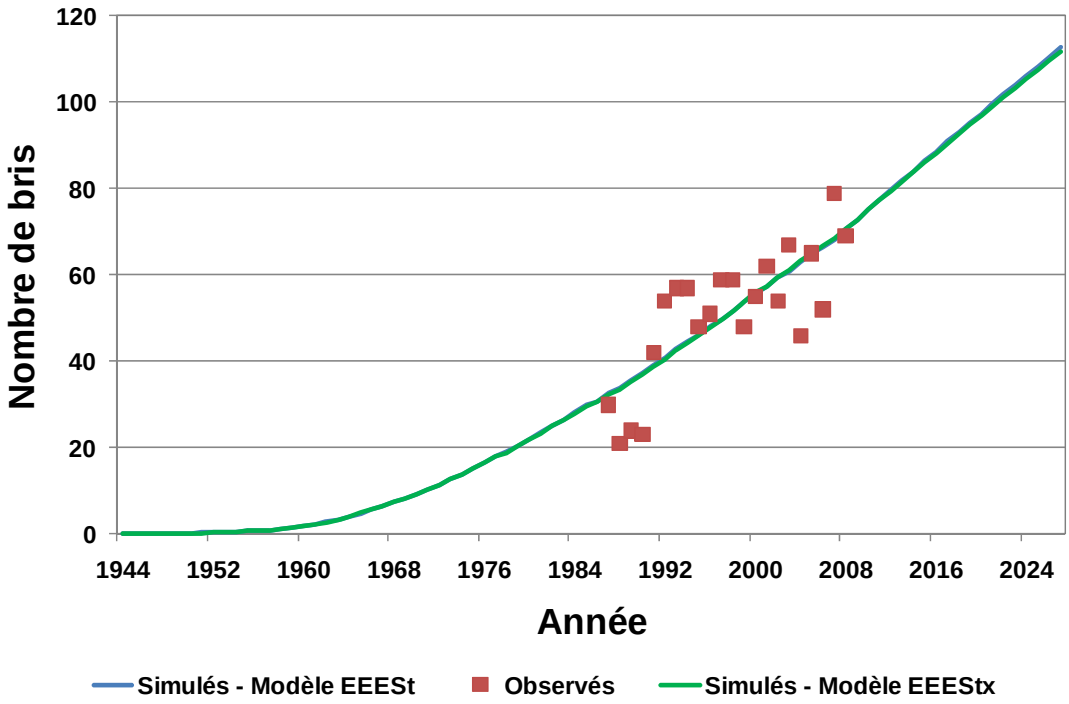


Figure 11 : Comparaison du nombre de bris simulés par les modèles *EEEStx* et *EEESt.*

4.3 Influence du diamètre sur le nombre de bris

L'influence du diamètre a été étudiée de deux façons différentes. La première façon consiste tout d'abord à caler le modèle ***EEEStx*** pour chaque catégorie de diamètre, en supposant que chaque catégorie de diamètre est représentative. Ensuite, on crée un réseau fictif qui correspond ici à la catégorie de diamètre 150 mm (le choix de cette catégorie comme réseau fictif s'explique par le fait qu'elle compte plus des deux tiers des conduites du réseau d'aqueduc de la municipalité de St-Georges). Enfin, on utilise les paramètres obtenus après calage de chaque catégorie de diamètre pour simuler l'impact du diamètre sur le nombre de bris du réseau fictif. Les résultats obtenus sont illustrés à la Figure 12.

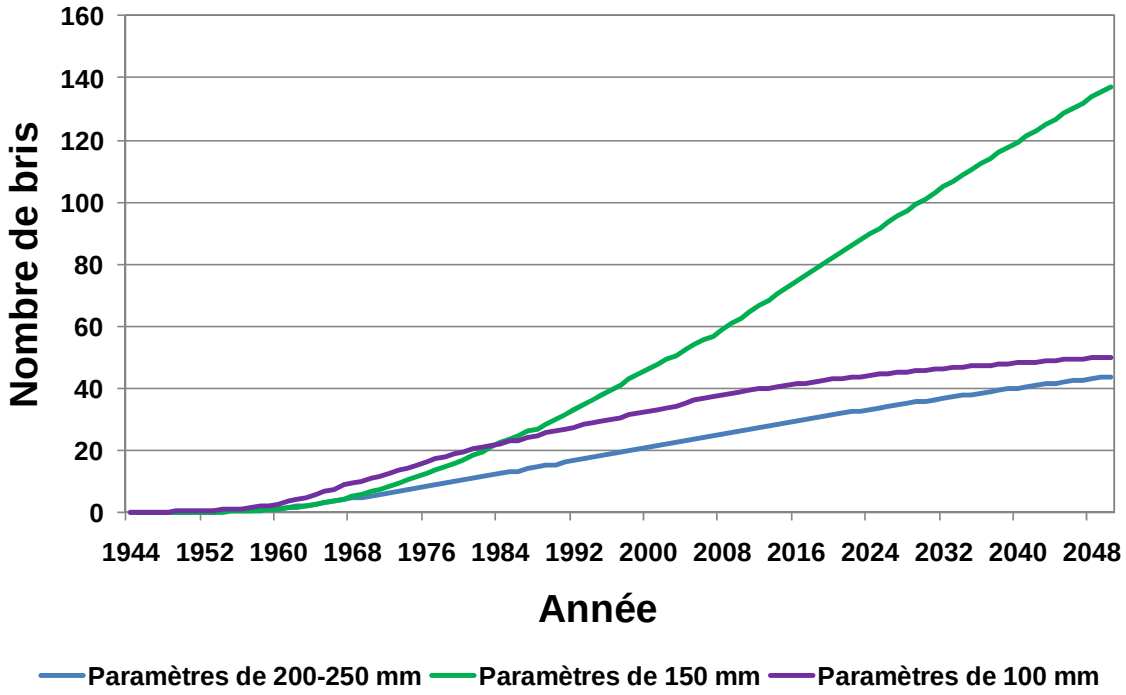


Figure 12 : Influence du diamètre sur le nombre de bris.

Selon la seconde méthode, afin d'identifier le diamètre de conduites qui brise le plus souvent, nous avons calculé, pour chaque classe de conduites, la probabilité d'avoir un bris à chaque année. Cette probabilité a été calculée avec le modèle ***EEEStx***, en divisant les conduites en trois groupes de diamètres, puis en estimant la valeur des paramètres $\{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3, \beta_1, \beta_2\}$ pour chacun de ces groupes. Ces paramètres ont par la suite été utilisés pour simuler l'impact du diamètre sur la probabilité de bris d'une conduite en fonction de l'âge. Deux longueurs ont été utilisées, soit 200 et 500 m. Ces simulations ont été réalisées successivement pour des diamètres de 100 mm, de 150 mm, puis de 200 mm. Le résultat est donné à la Figure 13.

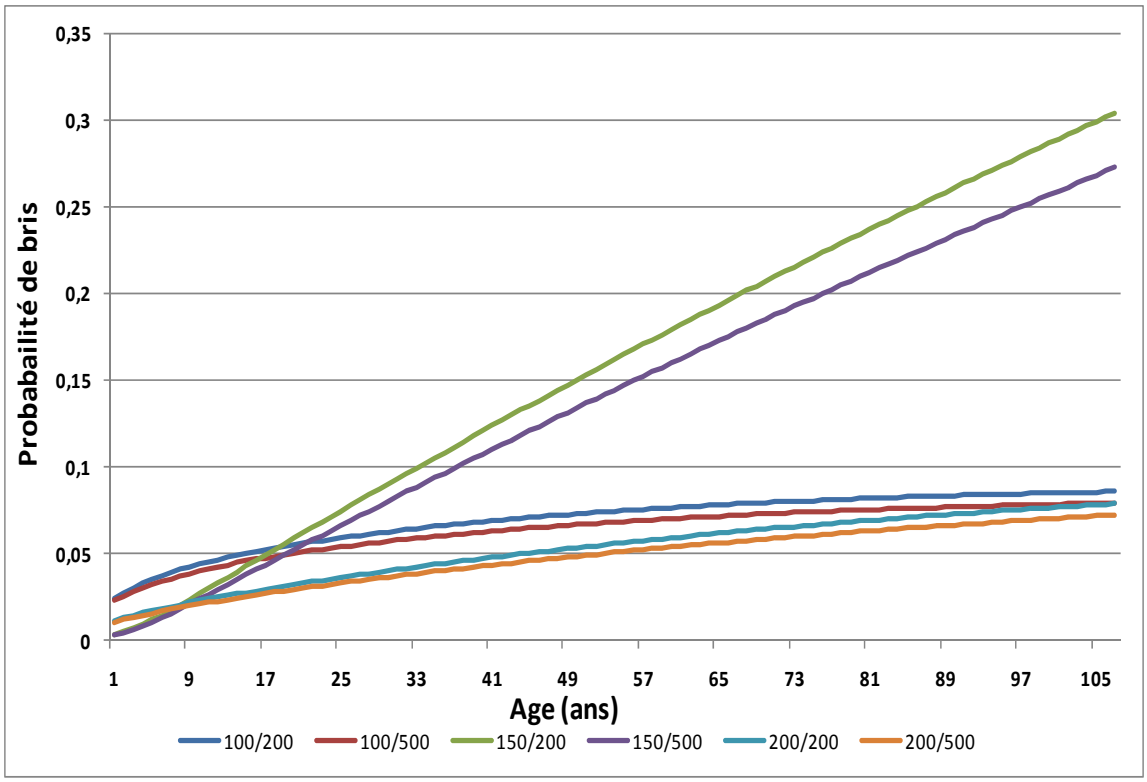


Figure 13 : Probabilité de bris en fonction de l'âge d'une conduite pour différentes classes de diamètre et pour des longueurs de 200 et 500 m (dans la légende, le premier nombre représente le diamètre, en mm, et le second nombre représente la longueur, en m).

D'après les résultats présentés aux deux figures précédentes, on se doit de constater que les conduites de diamètre 150 mm brisent plus que celles de diamètre 100 mm, qui à leur tour brisent légèrement plus que les conduites de diamètre 200 et 250 mm. Il nous apparaît donc que, pour le réseau de St-Georges, les conduites de diamètre 150 mm seraient celles qui sont les plus susceptibles de briser. En ce qui a trait à la longueur, l'écart n'est pas très significatif entre les conduites de 200 et de 500 m selon les résultats obtenus avec le modèle.

4.4 Conclusions

L'ensemble des résultats obtenus dans les différentes modélisations présentées aux sections précédentes nous amène à choisir le modèle ***EEESt*** pour la suite de notre étude sur l'évolution des bris. En effet, on a montré que le diamètre et la longueur des conduites avaient peu d'influence sur le nombre de bris simulés pour l'ensemble du réseau. De plus, les résultats obtenus pour les conduites de 100 mm et plus avec le modèle ***EEESt*** et avec le modèle ***EEEStx*** sont à toutes fins pratiques identiques. Il serait donc inutile de compliquer la modélisation en tenant compte des covariables pour la simulation du nombre total de bris sur le réseau.

5. Prédiction de l'évolution des bris de conduites d'aqueduc de la ville de St-Georges

Nous présentons tout d'abord dans ce chapitre, à la section 5.1, les résultats de l'application du modèle ***EEESt*** au réseau d'aqueduc de St-Georges. 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 St-Georges à la section 5.2; ce modèle se base sur le calcul d'un taux de bris par unité de longueur. À la section 5.3, 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. Des modèles simplifiés sont proposés puis testés à la section 5.4. Enfin, les taux de remplacement souhaitables pour le réseau d'aqueduc de St-Georges sont résumés à la section 5.5 puis les coûts associés à ces scénarios de remplacement sont estimés à la section 5.6.

5.1 Modélisation du nombre de bris

Les courbes représentant respectivement les bris moyens cumulés simulés et ceux observés cumulés, en fonction des années (de 1987 à 2008), ont été présentées à la Figure 1. Tel que mentionné précédemment, 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 aussi été présentée à la Figure 2. Encore là, on a pu constater, malgré la dispersion des valeurs observées, la capacité du modèle à bien simuler les bris observés.

5.1.1 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 14, 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 2033 les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 95 % des prévisions du modèle sont de 101 et 151 respectivement, alors que la moyenne est de 126.

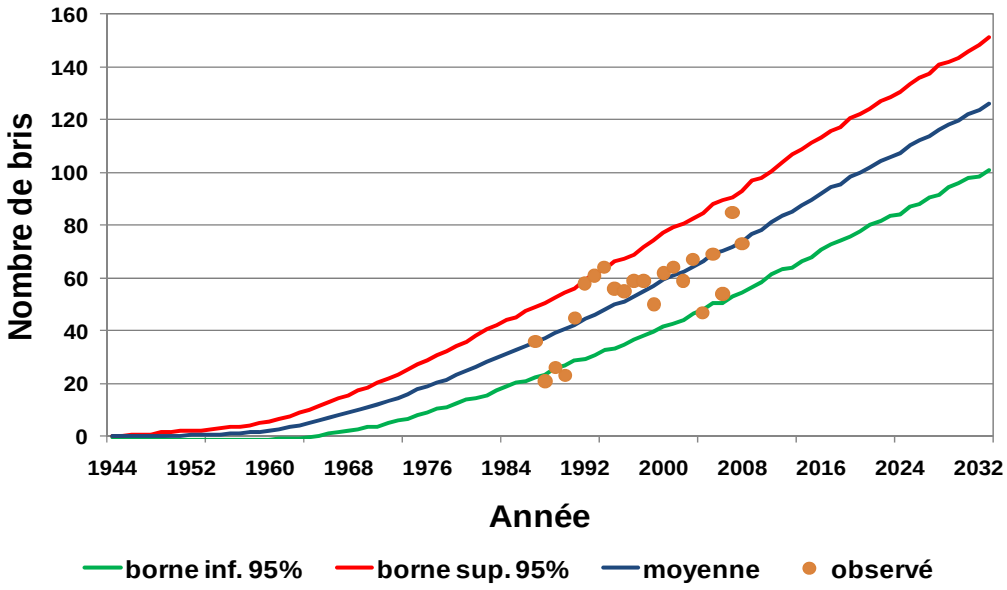


Figure 14 : Courbes de l'intervalle de confiance pour le nombre de bris simulé.

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

	Nombre de bris					
Année	**1987**	**1997**	**2007**	**2017**	**2027**	**2033**
Borne inférieure	23	37	53	73	90	**101**
Moyenne	36	53	72	94	114	**125**
Borne supérieure	50	69	91	116	137	**151**

5.1.2 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 paramètres obtenus avec la méthode des moindres carrés (voir section 3.2) sont utilisés pour évaluer l'impact des deux types de scénarios de remplacement.

5.1.2.1 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 2008. Le scénario de base étant celui donné à la Figure 2 (aucun remplacement). Les résultats de ces simulations sont présentés à la Figure 15 et au Tableau 2.

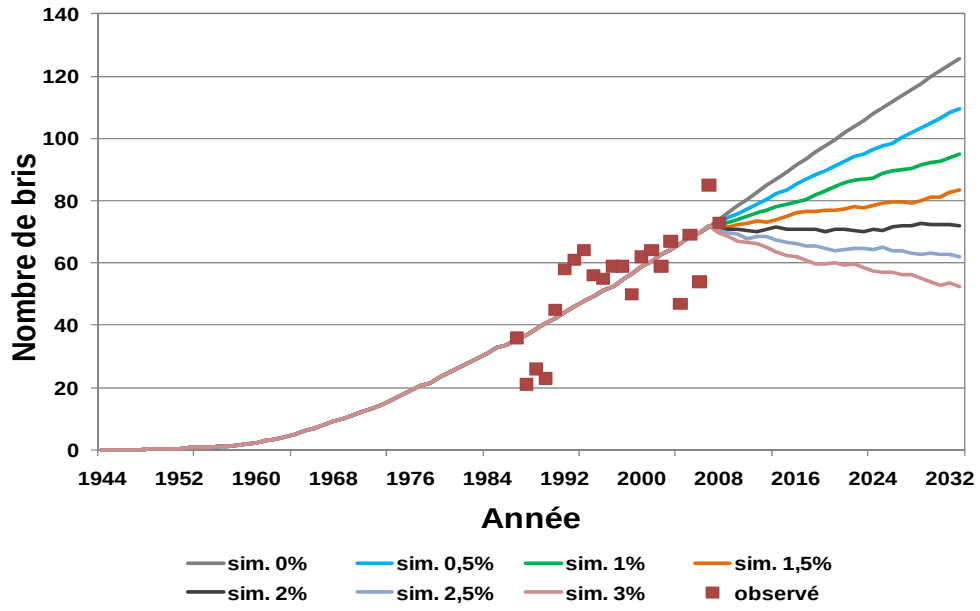


Figure 15 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur l'âge.

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 %
2007	72	72	72	72	72	72	72
2020	100	91	85	77	71	64	60
2030	120	105	92	81	72	63	54

5.1.2.2 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 la longueur totale du réseau en 2008. Les résultats obtenus pour ces scénarios sont donnés à la Figure 16 et au Tableau 3.

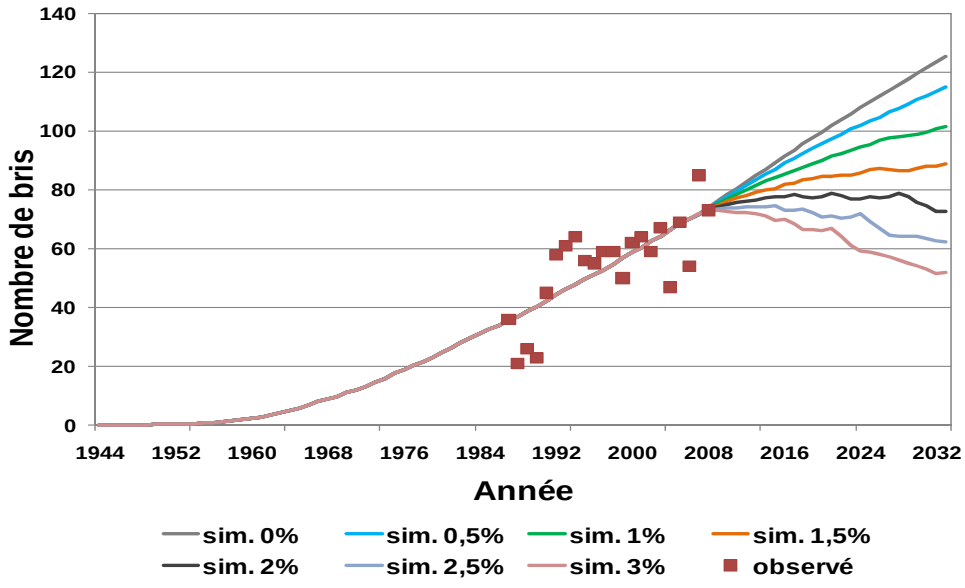


Figure 16 : Résultats de la simulation des scénarios de remplacement basés sur le nombre de bris.

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 %
2007	72	72	72	72	72	72	72
2020	100	96	90	85	78	71	66
2030	120	111	99	87	76	64	54

5.1.3 Impact du type de remplacement sur le nombre de bris

Il semblerait *a priori* que de 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, pour le taux de remplacement de 2 % à la Figure 17.

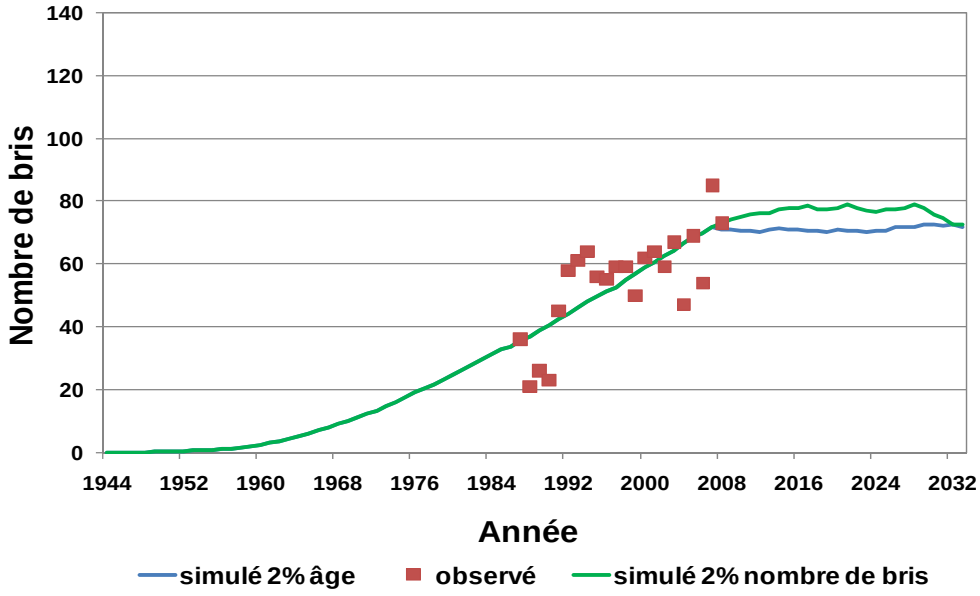


Figure 17 : Comparaison de deux scénarios de remplacement pour un remplacement annuel de 2 %.

Notons aussi que l'on observe la même tendance pour chacun des 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***.

Notons qu'à long terme, il est tout à fait logique que les deux scénarios se confondent puisque, selon le scénario simulé, la plupart des conduites les plus vielles auraient été remplacées après quelques dizaines d'années.

5.2 Modélisation du taux de bris

5.2.1 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 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 d'un bris par 200 m par an (ou encore de 0,25 bris par 50 m par an). Le résultat de cette restructuration donne la Figure 18, où on retrouve le taux de bris moyen observé en fonction de l'âge des conduites pour la ville de St-Georges.

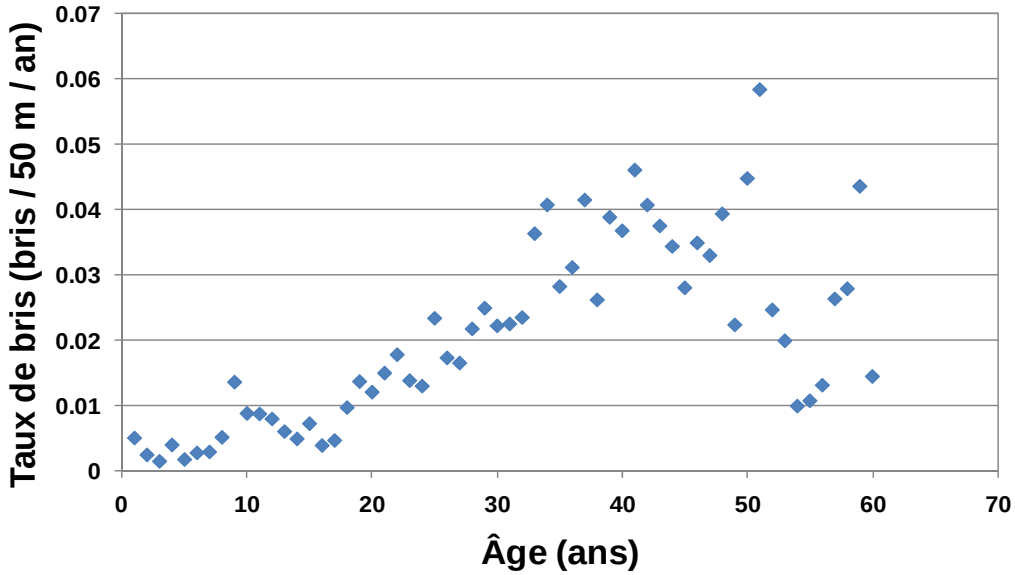


Figure 18 : Taux de bris moyen observé en fonction de l'âge.

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 18). Le modèle *TB* suivant a été utilisé pour modéliser le taux de bris :

$$TB(t) = -A + \frac{B}{C - e^{D*t}} \tag{6}$$

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.

5.2.2 Calage du modèle

Les données de taux de bris illustrées à la Figure 18 ont servi au calage du modèle, avec la méthode des moindres carrés. Les quatre paramètres (*A*, *B*, *C* et *D*) ainsi obtenus (*A* = -0,03804, *B* = 6,48552, *C* = -192,728 et *D* = 0,1943) sont ceux qui seront utilisés pour les simulations. La Figure 19 donne les résultats de la simulation du taux de bris en fonction de l'âge avec le modèle *TB*.

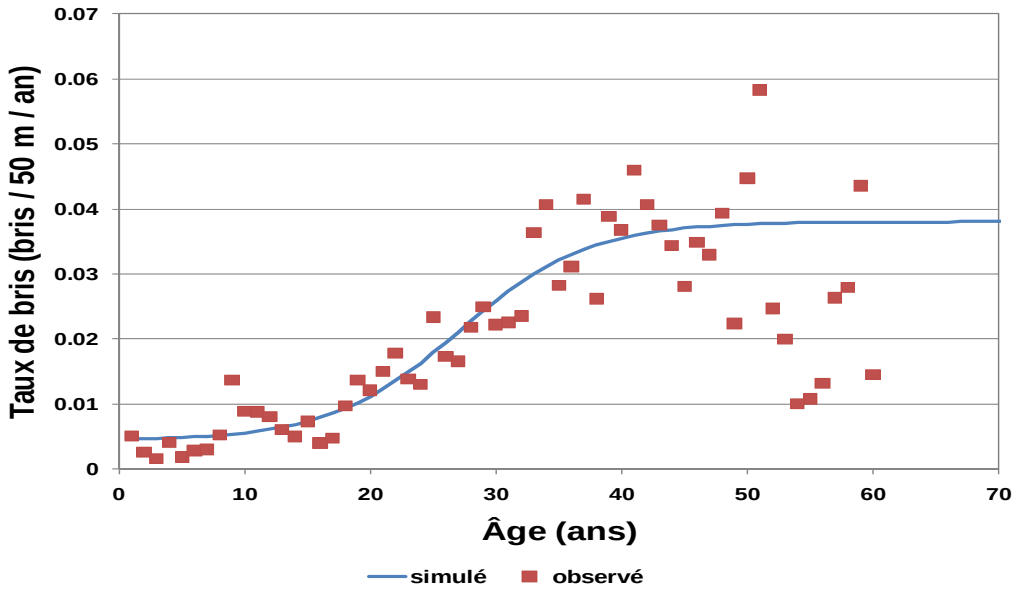


Figure 19 : Taux de bris moyen simulé en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.

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 à la Figure 20, qui illustre la simulation du nombre de bris à chaque année en utilisant le modèle *TB* (avec A = -0,03804; B = 6,48552; C = -192,728; et D = 0,1943).

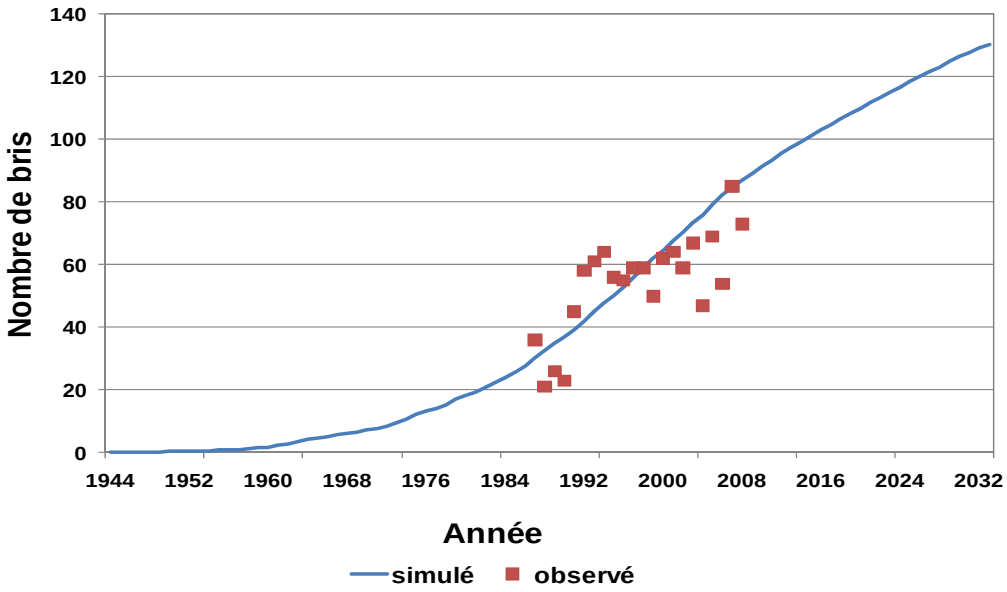


Figure 20 : Nombre de bris simulé avec le modèle de taux de bris en fonction de l'âge et comparaison avec les observations.

À la Figure 21, on compare les résultats du modèle de taux de bris (modèle *TB*) à ceux du modèle de nombre de bris (modèle ***EEESt***)**.** 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 50 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 2027 et 2033, l'écart entre les deux prévisions est de moins de 7 %. 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.

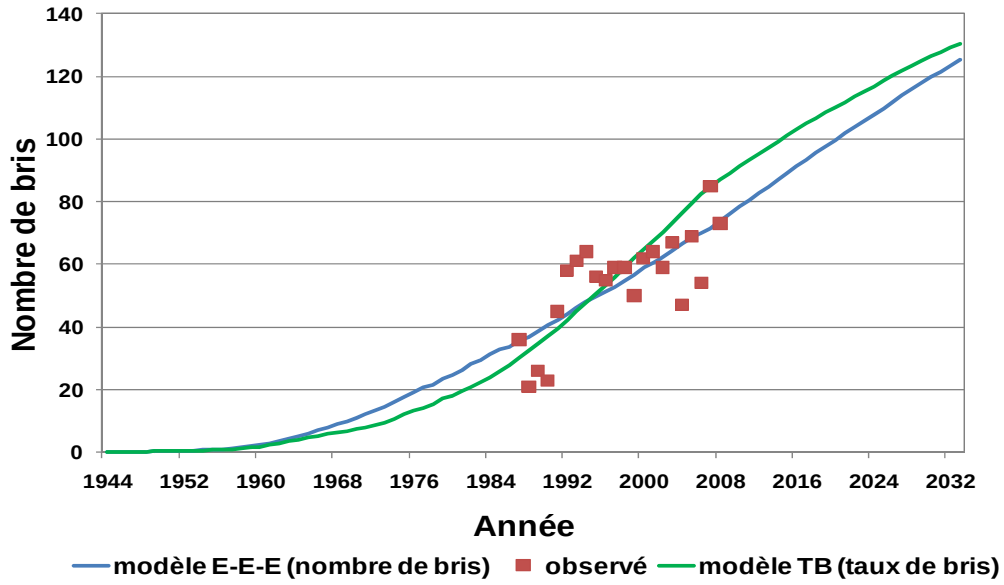


Figure 21 : Nombre de bris simulé par les modèles *EEESt* et *TB* et comparaison avec les observations.

Tableau 4 : Nombre de bris simulé de 1987 à 2033.

	Nombre de bris					
Année	**1987**	**1997**	**2007**	**2017**	**2027**	**2033**
Modèle *TB*	30	56	85	105	122	**130**
Modèle *EEESt*	36	53	72	93	114	**125**

5.3 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 MAMROT[1] : « 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. À partir de la fonction de distribution du temps d'arrivée du premier bris (voir section 2.2), 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 St-Georges, 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 22 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.

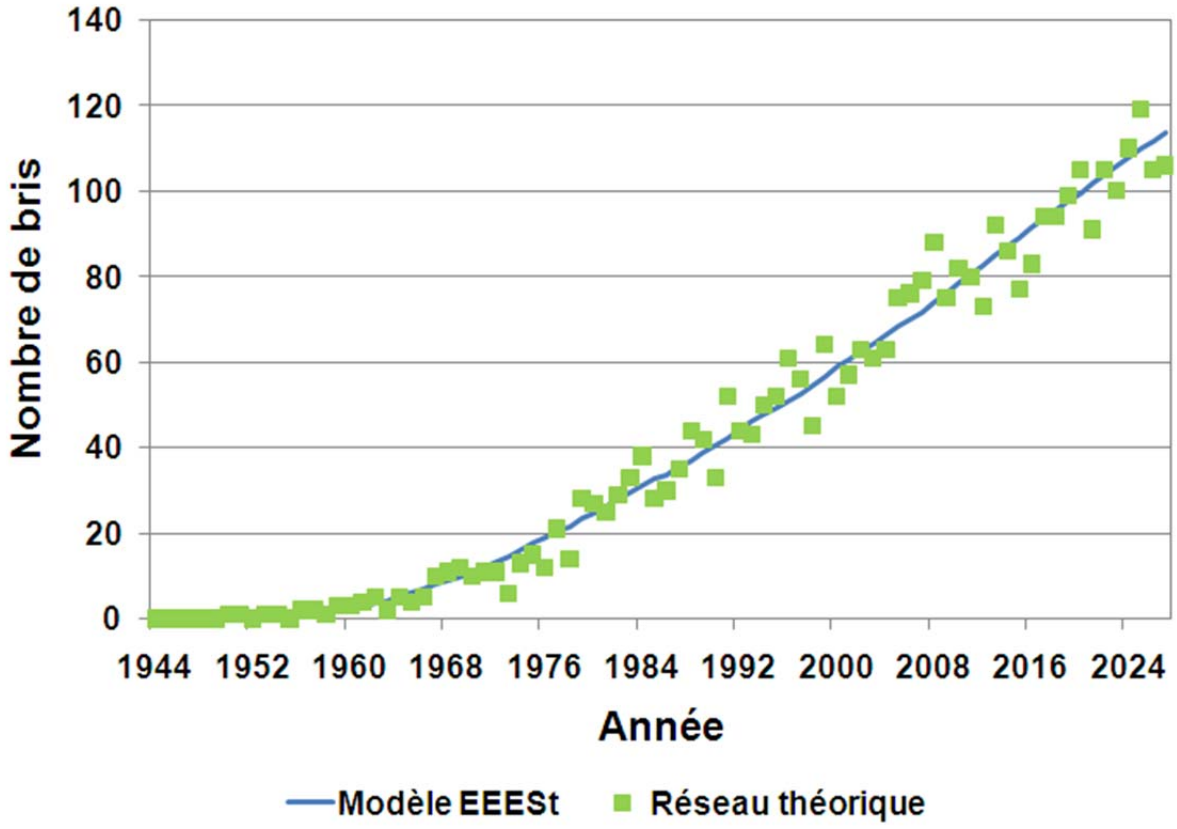


Figure 22 : Comparaison entre les résultats du modèle *EEESt* global et les bris du réseau théorique.

5.3.1 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 2008, 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 2027. Pour cette évaluation, on fait l'hypothèse que les nouvelles conduites installées de 2008 à 2027 n'atteindront pas le taux de 3 bris/km/an avant 2027 (en réalité, il s'avère que seulement 2 conduites sur 1 600 atteignent ce taux critique avant l'âge de 20 ans, ce qui est considéré comme négligeable). Les résultats obtenus sont donnés au tableau suivant (Tableau 5).

Tableau 5 : Longueur des 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)
2007	5,52	3,0 %
2008	0,82	0,4 %
2009	0,96	0,5 %
2010	1,35	0,7 %
2011	1,24	0,7 %
2012	0,23	0,1 %
2013	0,40	0,2 %
2014	0,35	0,2 %
2015	0,16	0,1 %
2016	0,51	0,3 %
2017	1,24	0,7 %
2018	0,81	0,4 %
2019	0,28	0,2 %
2020	0,64	0,3 %
2021	0,31	0,2 %
2022	0,82	0,4 %
2023	0,34	0,2 %
2024	0,76	0,4 %
2025	0,35	0,2 %
2026	1,57	0,9 %
2027	0,86	0,5 %

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 3,0 % 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 **0,4 % par année**. Cette stratégie demande beaucoup moins d'efforts de remplacement que celle qui viserait à stabiliser ou à diminuer le nombre total annuel de bris.

Ainsi, cette stratégie de remplacement signifie qu'en moyenne un taux de remplacement de 0,4 % 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 à partir de 2007.

Cependant, on se doit de noter que le remplacement selon ce critère conduirait à une augmentation du nombre de bris total sur le réseau (voir Figure 23). Il faudrait donc prévoir les ressources nécessaires pour faire face à l'augmentation du nombre total de bris annuel sur le réseau. Comme on peut le constater au Tableau 6, en appliquant cette stratégie, le nombre de bris moyen annuel passerait de 72 en 2007 à 107 en 2027, soit une augmentation de 49 % en 20 ans.

Tableau 6 : Nombre de bris simulé de 2007 à 2027.

	Nombre de bris				
Année	**2007**	**2012**	**2017**	**2022**	**2027**
Scénario 0 %	72	83	93	104	114
Scénario 0,5 % par an	72	82	91	99	106
Scénario de remplacement annuel des conduites ayant atteint le seuil critique	72	80	90	99	107

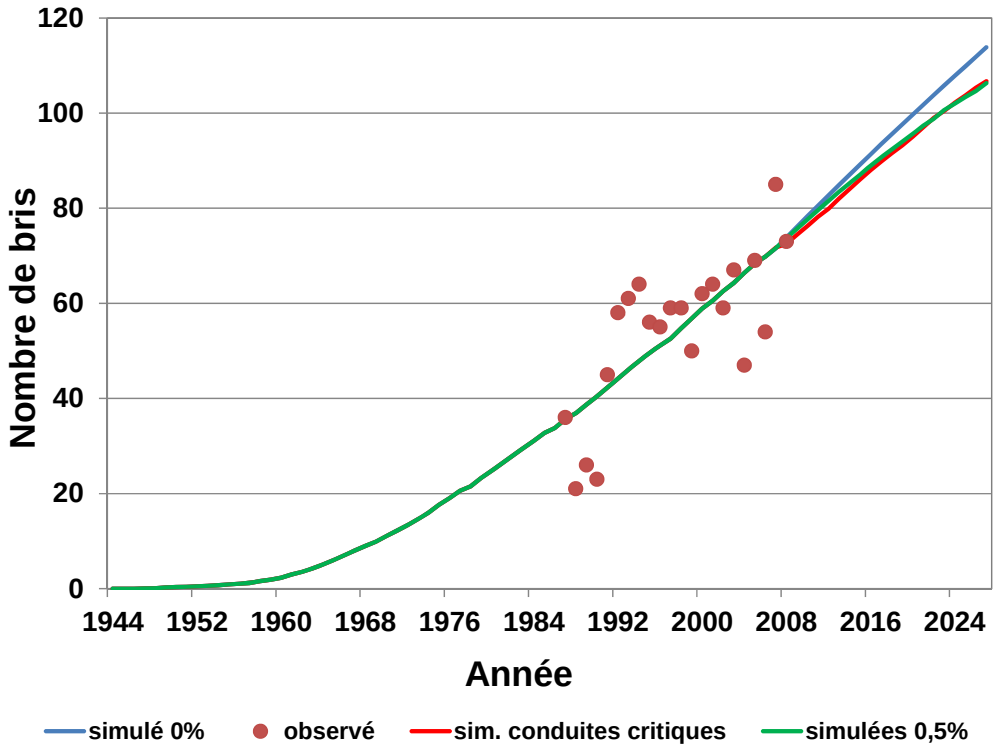


Figure 23 : Comparaison entre le remplacement constant et celui des conduites critiques à chaque année.

5.4 Proposition de modèles simplifiés

À la demande du MAMROT, nous avons développé des modèles simplifiés pour obtenir une évaluation approximative de l'évolution des bris sur les réseaux d'aqueduc de villes ne faisant pas partie de l'étude. Le premier de ces modèles donne une estimation de l'évolution du nombre total de bris sur le réseau, tandis que le second prédit la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an. Ces deux modèles nécessitent un historique de bris pour leur élaboration.

5.4.1 Modèle de prédiction du nombre de bris

On constate à la Figure 24 qu'une simple régression linéaire à partir des bris observés peut donner des résultats relativement près de ceux calculés avec le modèle ***EEESt***. La limite de cette approximation est qu'elle ne permet pas d'évaluer l'impact sur les bris de scénarios de remplacement. Cependant, elle peut indiquer l'évolution du nombre de bris sur une période de 20 ans, environ, en tenant compte de l'historique des bris.

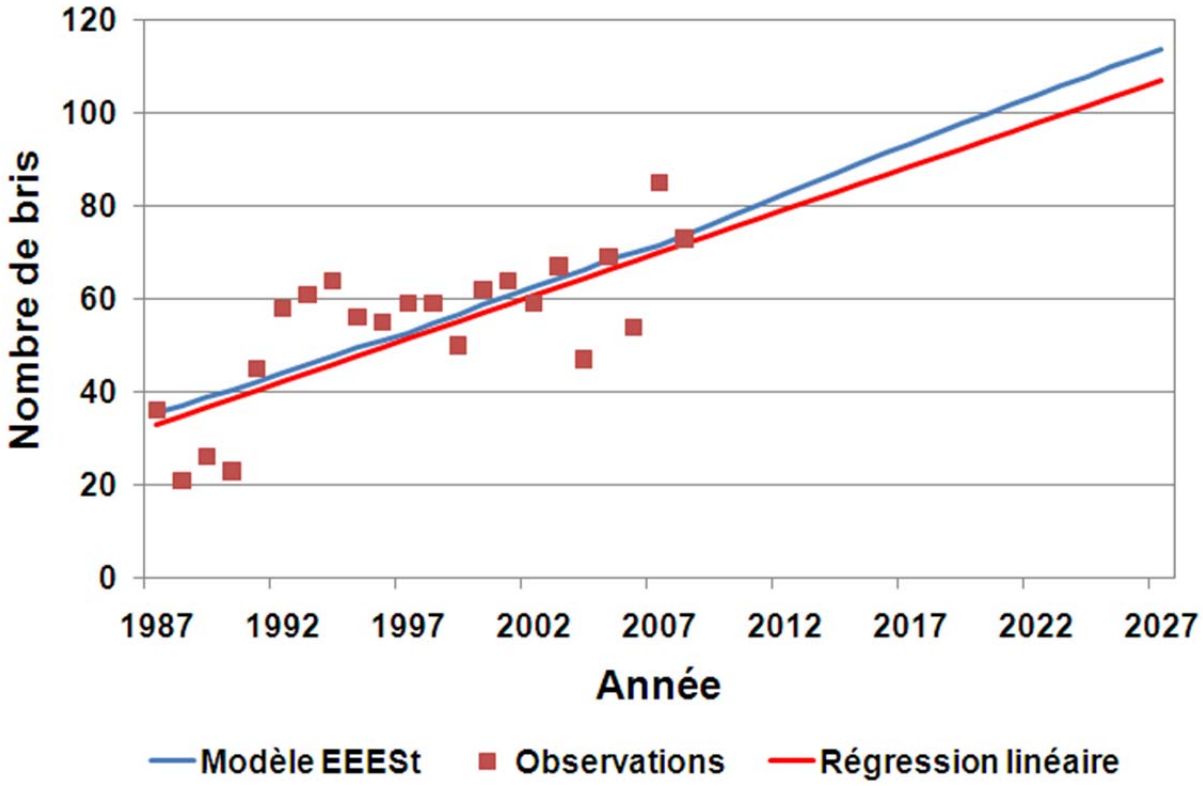


Figure 24 : Comparaison entre le modèle *EEESt* et la régression linéaire.

Cette régression linéaire ne devrait pas être utilisée pour une prévision au-delà de 20 ans. Par ailleurs, puisque cette équation ne tient aucunement compte des caractéristiques des conduites qui composent le réseau, elle permet seulement d'estimer le nombre de bris futurs en supposant que le réseau reste identique au cours des années suivantes. Ceci signifie donc que l'impact sur le nombre de bris de l'ajout, du remplacement ou de la réhabilitation de conduites ne peut pas être évalué avec ce modèle simplifié.

5.4.2 Modèle de prédiction de la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an

Un modèle simple permettant d'évaluer rapidement le pourcentage de la longueur du réseau atteignant, à chaque année, le taux critique de bris a été développé. Selon ce modèle, il s'agit d'ajuster la courbe qui semble le mieux représenter l'évolution de ce pourcentage, tel qu'évalué à partir de l'historique de bris disponible, directement dans le fichier Excel où sont colligées les données des conduites et des bris. Ce modèle simplifié ne tient pas compte de l'âge des conduites ni de son évolution dans le temps, mais calcule plutôt directement, à partir des

observations, le pourcentage de longueur de réseau atteignant le taux critique à chaque année. Dans le cadre de ce travail, deux courbes de régression distinctes ont été analysées : un modèle linéaire et un modèle exponentiel.

On retrouve ces deux ajustements à la Figure 25, comparés aux évaluations réalisées précédemment. Ainsi, sur cette figure, les carrés rouges représentent la longueur de conduites atteignant le taux de bris critique de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans), selon les données colligées dans l'historique de bris. Les régressions linéaire et exponentielle, en traits bleu et rouge respectivement, ont été établies à partir de ces points. Sur la même figure, on a illustré à l'aide de carrés verts la longueur de conduites qui atteindrait le taux de bris critique de 3 bris/km/an (calculé sur 5 ans), selon l'historique de bris théorique construit avec le modèle ***EEESt*** (voir section 5.3). On constate que les deux régressions, construites sur la base des données observées, fournissent une bonne estimation de ce qui est prédit à l'aide de la base de bris théorique. Il faut tout de même demeurer prudent dans l'utilisation de ces modèles approximatifs, qui fournissent des bornes inférieure et supérieure pour des évaluations rapides.

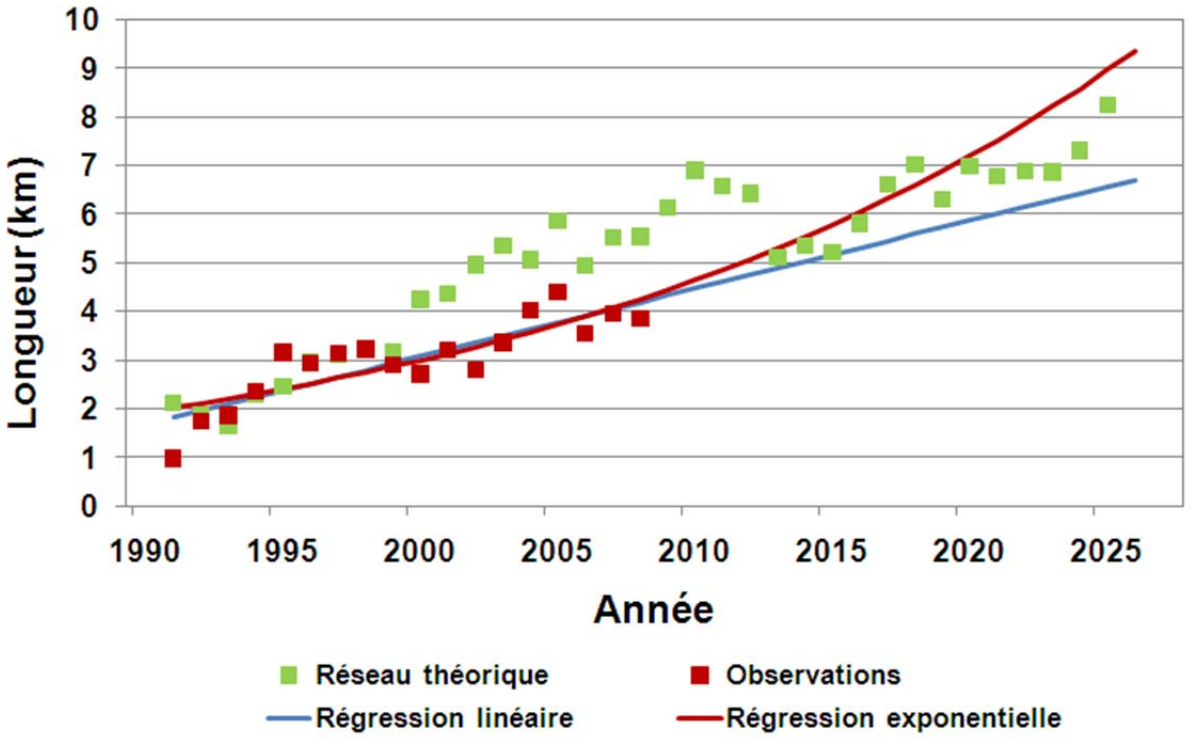


Figure 25 : Illustration des régressions linéaire et exponentielle de la longueur de conduites atteignant le taux critique de 3 bris/km/an, calculé sur 5 ans.

5.5 Taux de remplacement souhaitables pour la ville de St-Georges

D'après les résultats présentés précédemment, un taux de remplacement annuel moyen de 0,4 %, 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 3,0 % de conduites qui rencontrent déjà ce critère soient remplacées la première année). Par ailleurs, c'est un taux de remplacement annuel moyen de 2 % 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 que cet accroissement 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 11 dernières années (1996-2006) était de 0,4 % à St-Georges (la Figure 26 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 dans 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 5.3), ce taux de remplacement de 0,4 % serait celui qui permettrait effectivement de remplacer les conduites qui atteignent le taux de bris critique de 3 bris/km/an (à condition, bien entendu, que le retard accumulé soit comblé la première année).

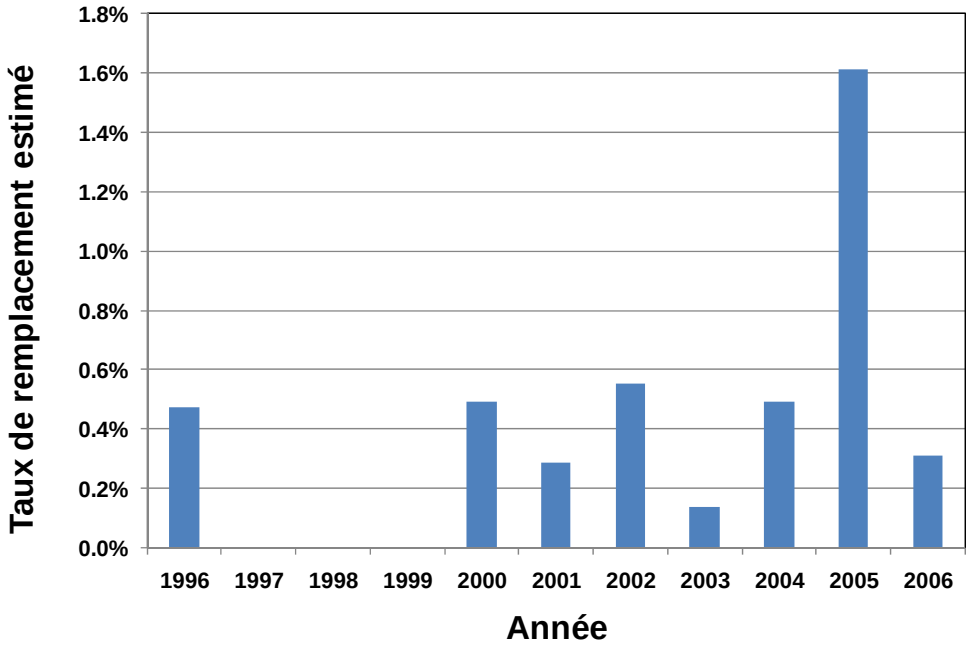


Figure 26 : Taux annuel de remplacement estimé de 1996 à 2006.

5.6 Estimation des coûts

Après avoir étudié l'impact des scénarios de remplacement sur le réseau de conduites d'aqueduc de la ville de St-Georges, 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 2 % 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 3,0 % 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.

5.6.1 Coûts de remplacement

On sait que le coût de remplacement d'une conduite dépend de plusieurs paramètres (diamètre, sans voirie, avec réfection, etc.). Le Tableau 7 donne le coût en fonction du diamètre pour différents types d'intervention[2]. Pour notre étude, trois types de coût 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 7 : 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 Tableau 7), le coût pour chaque année de remplacement de 2007 à 2027 a été calculé (les remplacements ayant commencé en 2007 et une prévision sur 21 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 27 donne une illustration des coûts pour le taux de remplacement de 0,5 %, tandis que le Tableau 8 donne les résultats complets de ce calcul. On note à la Figure 27 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.

[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.

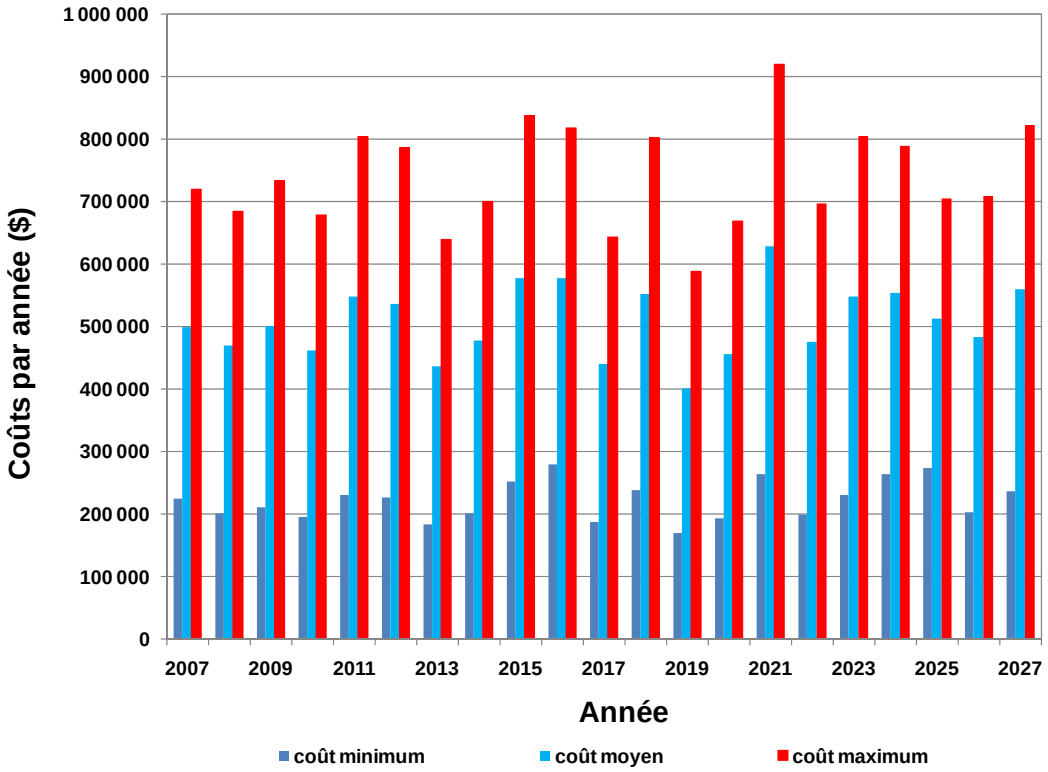


Figure 27 : Coûts annuels pour 0,5 % de remplacement.

Tableau 8 : Coûts de remplacement annuels moyens de 2007 à 2027 (en dollars CAN), en fonction du taux de remplacement.

Taux / Coûts	0,5 %	1 %	1,5 %	2 %	2,5 %	3 %
Coût sans voirie	221 836	452 706	671 250	955 204	1 198 854	1 464 955
Coût moyen	508 763	1 028 509	1 534 792	2 107 459	2 636 250	3 193 987
Coût total avec trottoirs	739 315	1 491 178	2 228 664	3 033 318	3 791 226	4 583 298

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 2,11 M $/an * 20 ans = 42 millions de dollars. Pour le scénario B, le coût total de remplacement serait d'environ 3,2 M $ + 0,5 M $/an * 19 ans = 13 millions de dollars sur 20 ans.

5.6.2 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 ***EEESt***, en supposant un taux de remplacement annuel de 2 % pour le scénario A et de 0,5 % pour le scénario B (voir les tableaux 12 et 15 en annexe). De cette façon, on obtient un coût total de réparation de 14 M $ sur 20 ans pour le scénario A et de 17 M $ sur 20 ans pour le scénario B.

5.6.3 Coûts totaux

Ainsi, le coût total estimé du scénario A, selon lequel on remplace annuellement 2 % du réseau pendant 20 ans afin de stabiliser le nombre annuel de bris, est de 56 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 30 millions de dollars.

5.7 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 St Georges.

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. Nous avons également développé un modèle qui tient compte, en plus de l'âge d'une conduite, de son diamètre et de sa longueur pour calculer sa probabilité de bris à chaque année. Divers tests réalisés avec ce modèle (appelé ***EEEStx***) ont permis de montrer que le diamètre et la longueur des conduites avaient peu d'influence sur le nombre de bris simulés pour l'ensemble du réseau. C'est donc le

modèle qui ne tient compte que de l'âge, le modèle ***EEESt***, que nous avons choisi d'utiliser pour les calculs subséquents.

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 2 % du linéaire de conduites par année pour maintenir le nombre de bris constant à partir de 2007 pour la ville de St-Georges.

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 3,0 % 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 0,4 % 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 30 millions de dollars (13 M $ pour les remplacements de conduites et 17 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 2 %, son coût total estimé sur 20 ans est de 56 millions de dollars (42 M $ pour les remplacements et 14 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 St-Georges. 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 St-Georges 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.

6. Création de la base de données des bris d'aqueduc de la ville de St Georges

6.1 Données initiales sur les bris

La Ville de St-Georges nous a fourni plusieurs documents, dont la table Access « Fuite sur le réseau d'aqueduc depuis 1987 », un plan d'intervention détaillé effectué par une firme de génie-conseil (Génivar) ainsi que différentes cartes et plans de la ville sous AutoCAD. Le table « Fuite sur le réseau d'aqueduc depuis 1987 » (contenue dans la base « Fuite d'eau potable 2000.mdb ») est une base de données qui rassemble toutes les fuites sur le réseau d'aqueduc qui ont été répertoriées depuis 1987. La table originale compte un total de 1 272 fuites et les informations qu'elle contient sont présentées au Tableau 9.

Tableau 9 : Aperçu de la table originale des fuites de la ville de St-Georges.

Champ	Exemple d'inscription
No Fuite	212
Date	1988-09-10
Année	1988
Secteur	est
Tronçon *	120R 008A 010A
Section évaluation	120R0 8A000 10A00
Rue ou avenue	120e rue
Civique	935
Réseau	1960
Diamètre	150
Matériaux	manchon de réparation 6.85 X 7.25 x 16" L,, 1 Y-5" PVC, 2 courbes 22 1/2' long, 2 collets 1004-44 rubber, 15' tuyaux DR-28-5", 21 v³ de gravier 0, 2 1/2, 5 v³ gravier 0, ¾
No_Type	11
Id_Pipe	
No_Matériaux_Conduite	2
No_fuite_bris	1
Commentaires	Le tuyau de fonte de 150 mm était cassé dans la pente au centre entre et le boulevard et le stationnement de Nautilus

** Note : La méthode pour interpréter le champ « Tronçon » est la suivante : le premier numéro indique la rue (ou l'avenue) sous laquelle est posée la conduite et les deux autres numéros indiquent les limites de ce tronçon. Dans l'extrait suivant : 120R 008A 010A, la fuite est sous la 120^{e} rue entre les 8^{e} et 10^{e} avenues. Il faut noter que ce ne sont pas toutes les fuites qui possèdent un numéro de tronçon.*

Le plan d'intervention (fichier « Talbeau PI St-Georges_G6236.xls ») contient les informations relatives à toutes les conduites d'aqueduc de la ville de St-Georges. Dans ce fichier, chaque conduite est associée à un numéro (champ « # » du Tableau 10) que l'on nommera « numéro du plan d'intervention ». Le Tableau 10 présente un extrait de ce fichier.

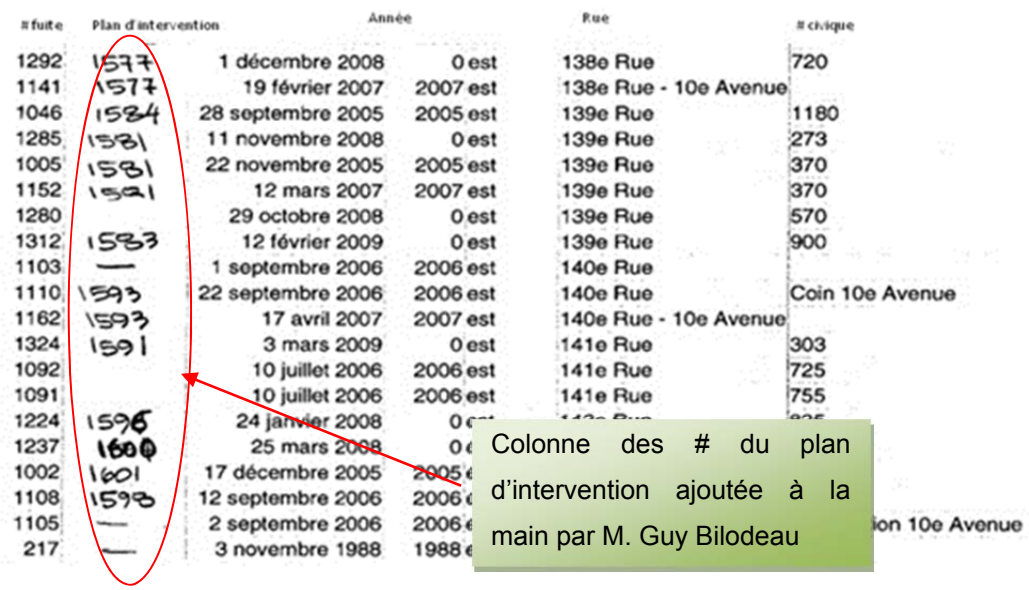
Tableau 10 : Extrait du plan d'intervention de la ville de St Georges.

		Localisation			Données						
Rang	**#**	**Rue**	**De**	**À**	Longueur (m)	Année	Diamètre (m)	Matériau	Bris	Remarques	Âge
1	1019	BOULEVARD LACROIX	128E RUE	129E RUE	55	1955	150	FG	1	0	51

À l'analyse des deux tableaux précédents, on remarque que les informations fournies dans les deux fichiers ne nous permettent pas d'associer les fuites aux conduites; il manque un élément de jonction majeur. En effet, la localisation des fuites est donnée par un numéro civique et un nom de rue, sans que l'on sache sur quel tronçon le bris est survenu (les tronçons ayant leur propre numéro et n'étant pas associés à des numéros civiques). Il est donc impossible de situer l'emplacement d'un bris sur un tronçon sur la base des informations contenues dans ces deux fichiers. La section suivante décrit comment le lien manquant a pu être comblé.

6.2 Distribution des bris sur les conduites

Pour pallier le problème de la jonction des bris aux conduites, il nous fallait au moins une des informations suivantes : 1) soit des informations concernant la voirie, pour connaître l'emplacement sur les rues des numéros civiques; ou 2) soit des informations concernant les fuites, pour que l'on ait un numéro de tronçon associé. Suite à l'analyse de ce problème, la Ville de St-Georges s'est proposée pour ajouter un champ nommé *Plan d'intervention* au fichier des fuites. Ce travail nécessitait une bonne connaissance de la ville afin de repérer facilement les rues et de pouvoir associer un numéro de conduite à chaque fuite. Ce travail à été fait en partie par M. Guy Bilodeau de la Ville de St-Georges. Un extrait du document est présenté à la Figure 28.



# fuite	Plan d'intervention	Année		Rue	# civique
1292	1577	1 décembre 2008	0 est	138e Rue	720
1141	1577	19 février 2007	2007 est	138e Rue - 10e Avenue	
1046	1584	28 septembre 2005	2005 est	139e Rue	1180
1285	1581	11 novembre 2008	0 est	139e Rue	273
1005	1581	22 novembre 2005	2005 est	139e Rue	370
1152	1581	12 mars 2007	2007 est	139e Rue	370
1280		29 octobre 2008	0 est	139e Rue	570
1312	1583	12 février 2009	0 est	139e Rue	900
1103	—	1 septembre 2006	2006 est	140e Rue	
1110	1593	22 septembre 2006	2006 est	140e Rue	Coin 10e Avenue
1162	1593	17 avril 2007	2007 est	140e Rue - 10e Avenue	
1324	1591	3 mars 2009	0 est	141e Rue	303
1092		10 juillet 2006	2006 est	141e Rue	725
1091		10 juillet 2006	2006 est	141e Rue	755
1224	1596	24 janvier 2008	0		
1237	1600	25 mars 2008	0		
1002	1601	17 décembre 2005	2005		
1108	1598	12 septembre 2006	2006		
1105	—	2 septembre 2006	2006		ion 10e Avenue
217	—	3 novembre 1988	1988		

Figure 28 : Extrait du fichier ayant servi à faire la jointure entre les fuites et les conduites.

Sur cette même figure, on voit que ce ne sont pas toutes les fuites auxquelles il a été possible d'associer un numéro du plan d'intervention. Sur les 1 273 fuites, 974 ont été associées à un tronçon par le personnel de la Ville de St-Georges. Il nous restait donc 298 fuites à joindre aux tronçons de conduites.

Pour associer les conduites aux fuites, nous avons dû utiliser les informations disponibles dans le champ *Civique* de la table des fuites. Dans ce champ de la base de données des fuites, on retrouvait soit : 1) les noms des rues formant un coin de rue; 2) une description de lieu; 3) un numéro civique; ou 4) rien du tout. C'est à l'aide de ces informations que nous avons tenté d'associer le plus grand nombre de fuites à un numéro de tronçon. Les paragraphes suivants expliquent la démarche suivie.

6.2.1 Fuites sans numéro civique

Il y a un total de 44 fuites sans information dans le champ *Civique*. Cependant, il arrive que dans le champ *Tronçon* de la table des fuites, nous soyons capables de tirer de l'information. Par exemple, s'il est écrit 007A 013R 014R dans le champ *Tronçon*, cela signifie que la fuite est certainement sur le tronçon illustré à la figure suivante.

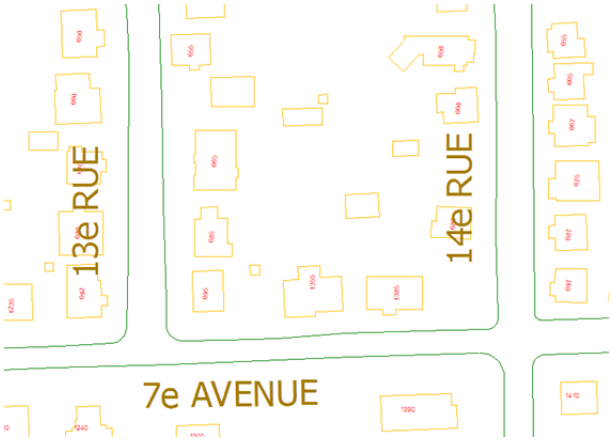


Figure 29 : Exemple de la carte de la ville en fichier AutoCAD.

Par contre, aucune carte fournie par la Ville de St-Georges n'affiche à la fois les numéros du plan d'intervention et le nom des rues et avenues. Il faut donc repérer, sur la carte des numéros du plan d'intervention, l'endroit de la fuite et noter le numéro du plan d'intervention. La Figure 30 est un extrait du fichier AutoCAD nommé « INTERVENTION-INRS ». Selon cette figure, la fuite repérée à la Figure 29 est située sur le tronçon 2 052 de la Figure 30.

Il a été possible de récupérer sept bris de cette façon.

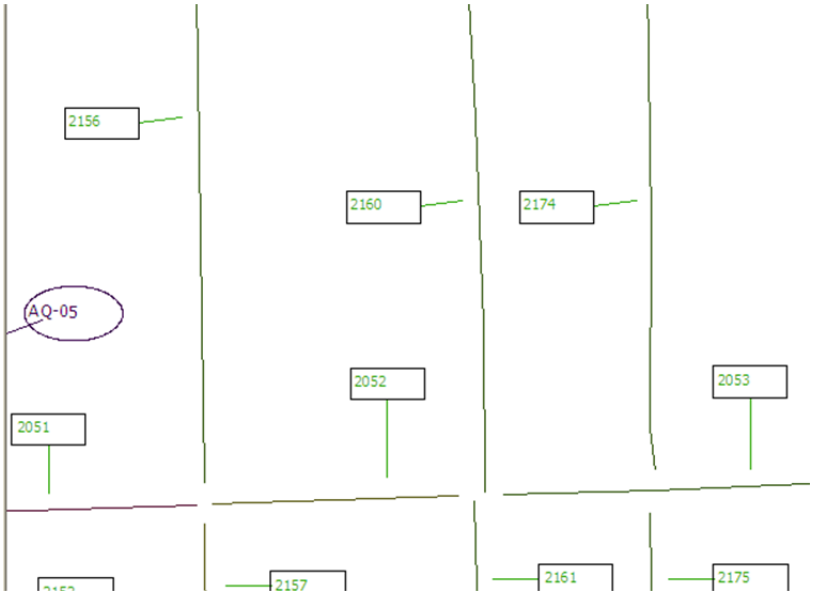


Figure 30 : Exemple du fichier AutoCAD du plan d'intervention.

6.2.2 Fuites sur des coins de rue

Cent quarante (140) fuites sont inscrites dans la table avec un nom de rue dans le champ *Civique*. La méthode employée pour associer à cette fuite un numéro du plan d'intervention est décrite ici-bas. D'abord, on trouve le coin de rue avec le logiciel GoogleMaps (Figure 31).

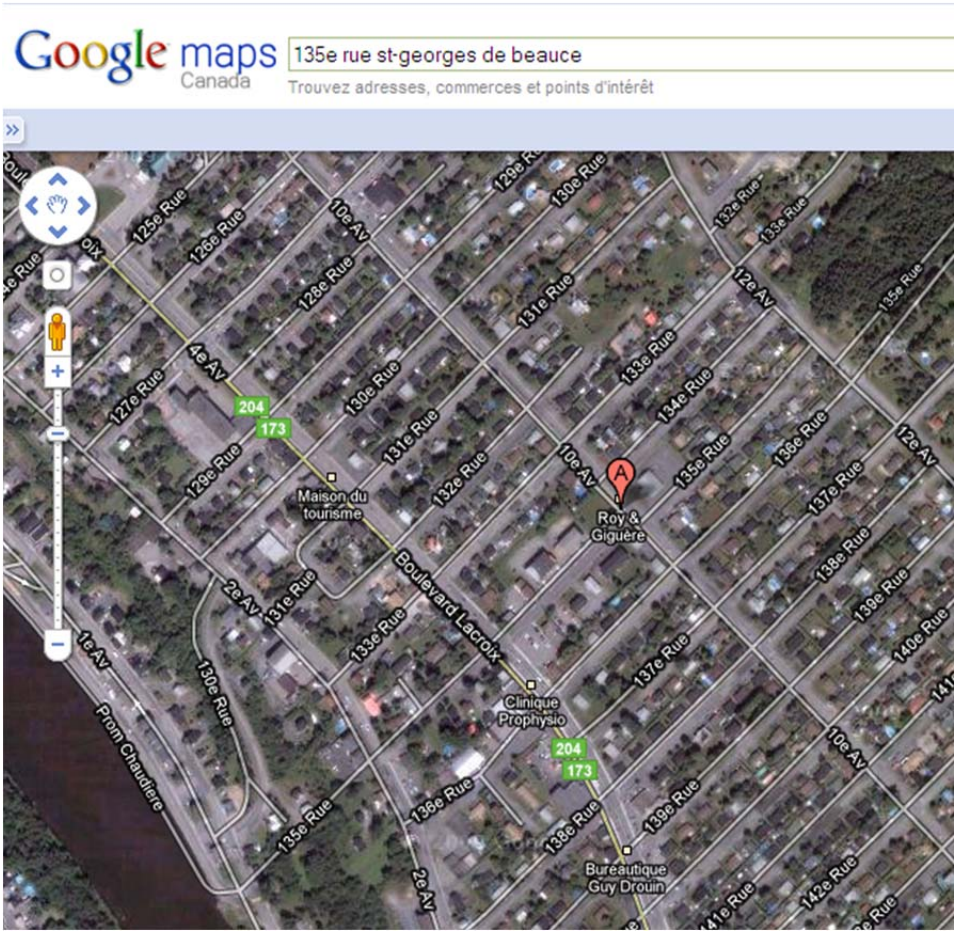


Figure 31 : Exemple de recherche d'une rue sur GoogleMaps.

Ce logiciel permet la recherche d'une rue par mot-clé, ce que le plan de la ville en AutoCAD ne permet pas. Ensuite, on repère visuellement cet endroit sur la carte AutoCAD du plan d'intervention. Il est possible, même s'il n'y a pas de nom de rue sur la carte AutoCAD, de reconnaître les rues seulement par leur aspect géométrique global. Lorsque la correspondance est trouvée, on inscrit dans le fichier Excel des fuites le numéro de la conduite.

Nous avons pu récupérer 139 fuites sur 140 de cette façon.

6.2.3 Fuites avec numéro civique

Un peu comme pour les coins de rue, une recherche GoogleMaps permet de retrouver l'endroit de la fuite sur une carte et ensuite de l'associer au plan d'intervention.

Soixante-douze (72) fuites sur 87 ont ainsi été répertoriées. Les 15 autres fuites n'ont pas pu être associées à un tronçon de conduite, soit parce qu'il n'y avait pas de conduites au numéro civique indiqué ou soit parce que le numéro civique n'existait pas.

6.2.4 Fuites avec description de lieu

Une description de lieu peut être le nom du propriétaire du terrain, un nom de commerce ou encore un parc. Parfois, il est possible de retrouver cet endroit, mais dans bien des cas cela est impossible. Dans le même ordre d'idée que pour les fuites sans numéro civique, nous nous sommes servis du numéro de tronçon pour trouver la conduite et y associer un numéro du plan d'intervention.

Sur un total de 27 fuites, seulement trois ont pu être associées à un tronçon de cette façon.

6.2.5 Résultat de la localisation des bris

Un total de 1 196 fuites ont finalement pu être associées à un tronçon du plan d'intervention et donc utilisées pour la modélisation. L'historique de tous les bris que nous avons pu répertorier est tracé sur la Figure 32. La densité des bris par secteur est illustrée à la Figure 33.

À partir de ces informations, nous avons créé un fichier contenant toutes les conduites du réseau de distribution d'eau potable de St-Georges. Chaque ligne de ce fichier (« ModeleSGT_MiseEnForme.xls », joint à ce rapport) correspond à une conduite. Sur chaque ligne, on y retrouve les caractéristiques de la conduite de même que tous les bris (ainsi que leur date) qui ont été répertoriés sur cette conduite.

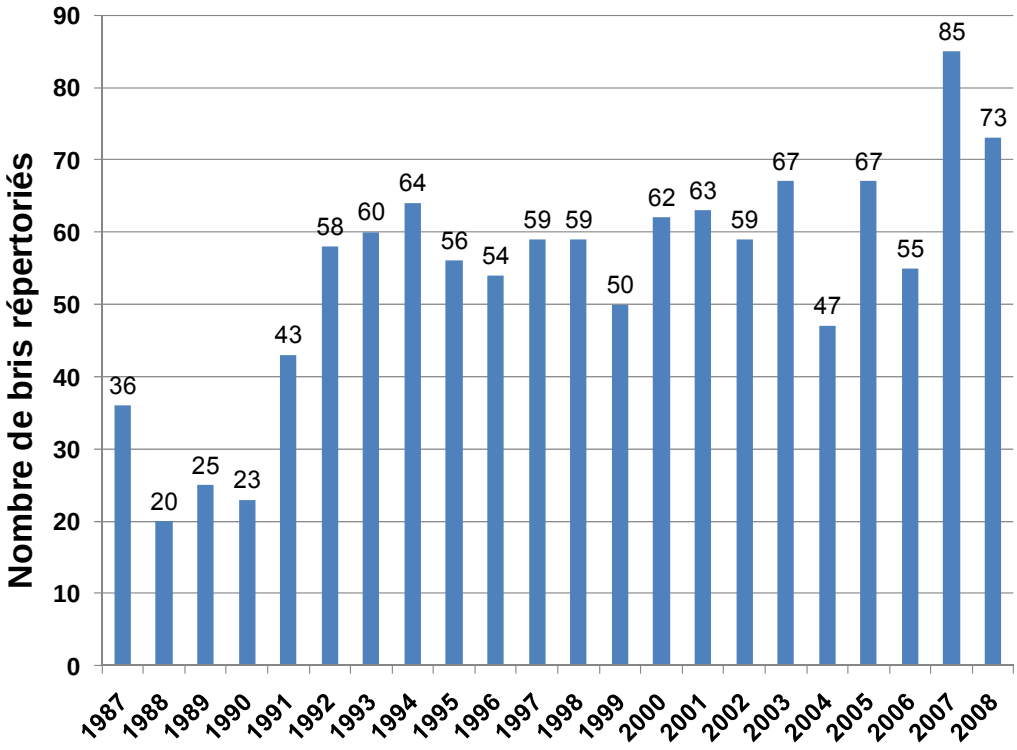


Figure 32 : Historique de bris de la ville de St-Georges de 1987 à 2008.

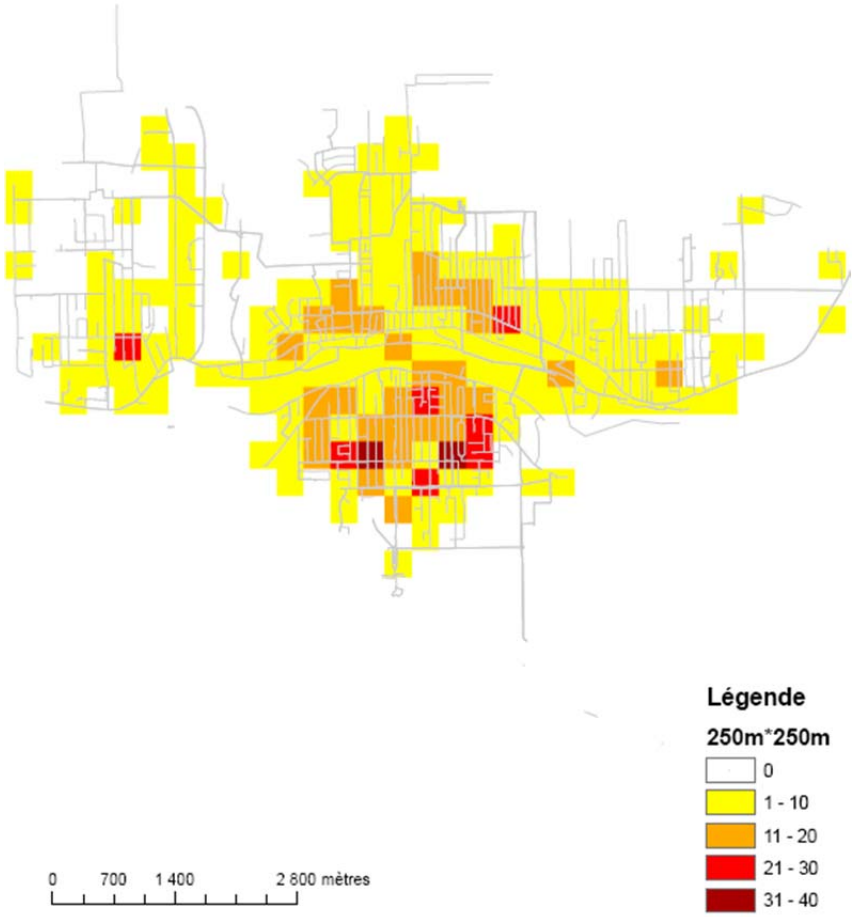


Figure 33 : Nombre de bris enregistrés à St-Georges de 1987 à 2008, par carreau de 250 m par 250 m.

6.2.6 Les conduites remplacées

En analysant la base de données des fuites créée selon la méthode décrite aux sections précédentes, nous avons constaté plusieurs cas où la date d'installation d'une conduite était postérieure à la date du premier bris enregistré sur cette conduite. Ceci peut survenir lorsqu'une conduite a été remplacée. Dans ce cas, seule l'information concernant la nouvelle conduite mise en place est conservée dans la base de données, tandis que la conduite remplacée (l'ancienne) est tout simplement supprimée de la base de données. Cependant, les informations concernant l'ancienne conduite (c.-à-d. celle qui était en place lorsque la fuite est survenue) sont importantes pour pouvoir développer et appliquer le modèle de prédiction des taux de bris. Le prochain chapitre explique en détails le raisonnement suivi et toutes les étapes effectuées afin de construire une base de données contenant les conduites d'aqueduc remplacées de la ville de St-Georges.

7. Estimation des remplacements de conduites de la ville de St-Georges

7.1 Préambule

Cette partie a pour but de décrire toutes les étapes effectuées afin d'identifier les conduites ayant été remplacées, d'après nos estimations, sur le réseau d'aqueduc de la ville de St-Georges. Ce chapitre renferme les principales hypothèses utilisées pour identifier les conduites ayant été remplacées ainsi qu'une description de la méthodologie.

7.2 Problématique

La base de données des conduites d'aqueduc de la ville de St-Georges contient les données concernant les conduites en place en 2006, année précédant le dernier plan d'intervention de 2007. En examinant cette base de données, 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 de données 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 sans qu'elles aient subi de bris au cours de leur vie utile. Dans ces cas, nous ne sommes pas en mesure de dire avec certitude que ces conduites ont été remplacées, puisque la preuve d'un bris antérieur à la date de pose est absente. Une méthode d'analyse spatiale a été développée afin de permettre de remédier à ce problème. Celle-ci sera présentée dans la prochaine section.

7.3 Travaux préliminaires

7.3.1 Conversion des fichiers AutoCAD en ArcGIS

ArcGIS nous permet d'effectuer des opérations de recherche et de sélection très utiles pour ce type de travail. En effet, il est possible de rechercher un numéro de conduite sur la carte en format ArcGIS, ce que les plans AutoCAD de la ville de St-Georges ne nous permettent pas de faire. Il a donc fallu traduire les cartes AutoCAD en cartes ArcGIS à l'aide du logiciel FME Universal Translator. Suite à cette transformation, le système d'information géographique ArcGIS permet d'afficher les années d'installation des conduites avec un code de couleurs, ce qui permet de mieux visualiser les années de construction des secteurs. À titre d'exemple, sur la Figure 34, il est possible de voir que le nord du secteur Ouest est plus ancien que le sud ce même secteur.

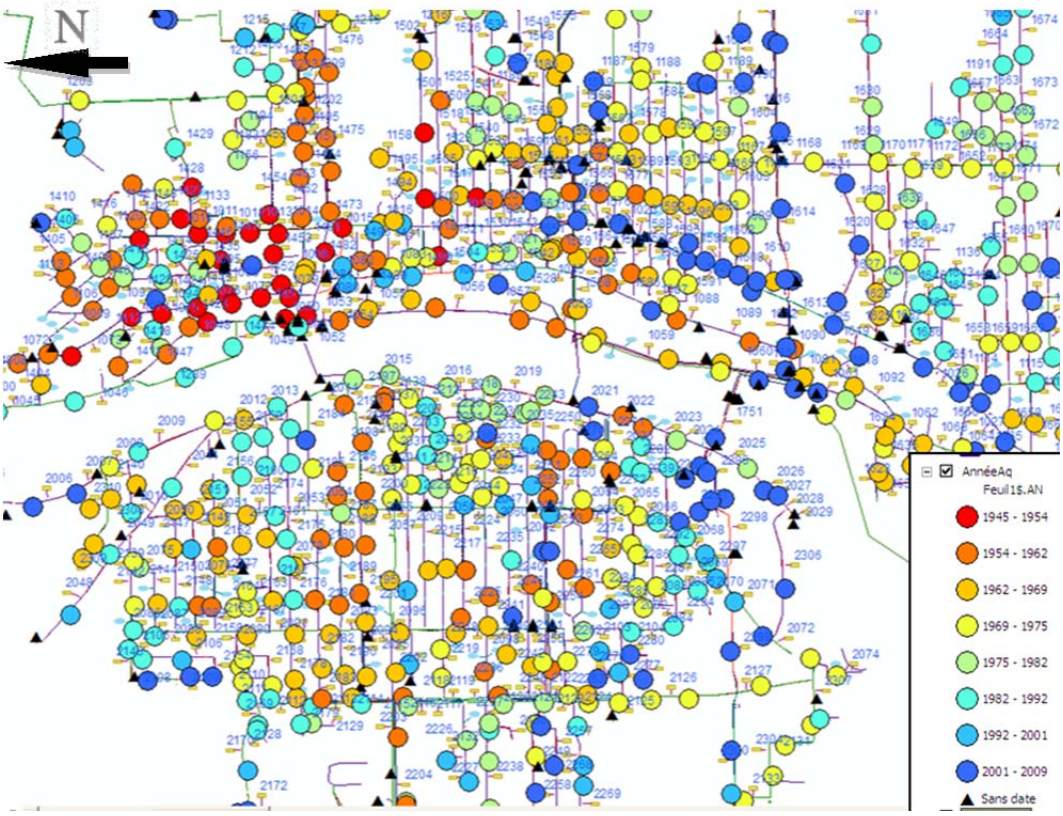


Figure 34 : Année d'installation des conduites de la ville de St-Georges, affichage par ArcGIS[3].

[3] Les années d'installation apparaissent sous forme de cercles, puisque c'est une donnée « texte » qui est affichée et non un attribut numérique.

7.4 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'Excel, puis en analysant les dates d'installation des conduites par secteur à l'aide d'ArcGIS. Les paragraphes suivants décrivent chacune de ces étapes.

7.4.1 Identification des conduites remplacées à partir des dates de bris sur Excel

Le fichier Excel utilisé est la base de données standard (ModeleSGT_MiseEnForme.xls). Cette base de données est présentée au chapitre 6. Pour identifier une conduite remplacée, il suffit d'effectuer un test logique à l'aide d'Excel en comparant la date du premier bris avec l'année d'installation. Dans le cas où l'année d'installation est postérieure à la date du premier bris, cette conduite est jugée comme ayant été remplacée. De cette façon, 44 conduites ont été jugées remplacées.

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

En affichant les conduites selon des classes d'âge distinctes sur une carte ArcGIS, on peut identifier des conduites qui ont probablement été remplacées. À la Figure 35, par exemple, dans un environnement avec des teintes orangées (années 1954-1962), il y a une conduite affichée en vert, posée en 1980. On juge alors que cette conduite a été remplacée en 1980, que l'ancienne conduite avait été posée en 1962 et qu'elle a été excavée en 1980. De cette façon, 52 conduites ont été jugées remplacées.

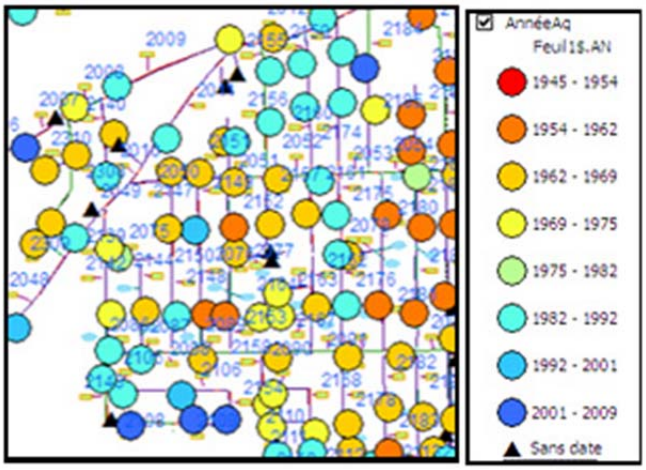


Figure 35 : Exemple de repérage visuel des conduites remplacées.

7.4.3 Transcription dans Excel

Tous les ajouts de conduites ont été effectués dans Excel. La méthode utilisée est la suivante :

- ✓ Repérer la conduite dans ArcGIS.
- ✓ 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 « Numéro conduites » les lettres INRS à la suite du numéro déjà existant
    - o Exemple : 2135 devient 2135INRS.
- ✓ Inscrire dans le champ « Date 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 (ordre des 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 11 est un exemple du doublement d'une conduite.

Tableau 11. Exemple du doublement d'une conduite.

	N° CONDUITE	Année d'installation	Année de remplacem.	Matériau	Diamètre (mm)	Longueur (m)	[…]	Bris 1	Bris 2	Bris 3
Conduite remplacée	2270INRS	1977	2006	Fonte ductile	150	60	[…]	1996	2005	2005
Nouvelle conduite	2270	2006		Fonte ductile	150	60	[…]			

Année de remplacement = Année d'installation

7.5 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.

7.5.1 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 violet directement sur le plan de la ville. Le résultat apparaît à la Figure 36.

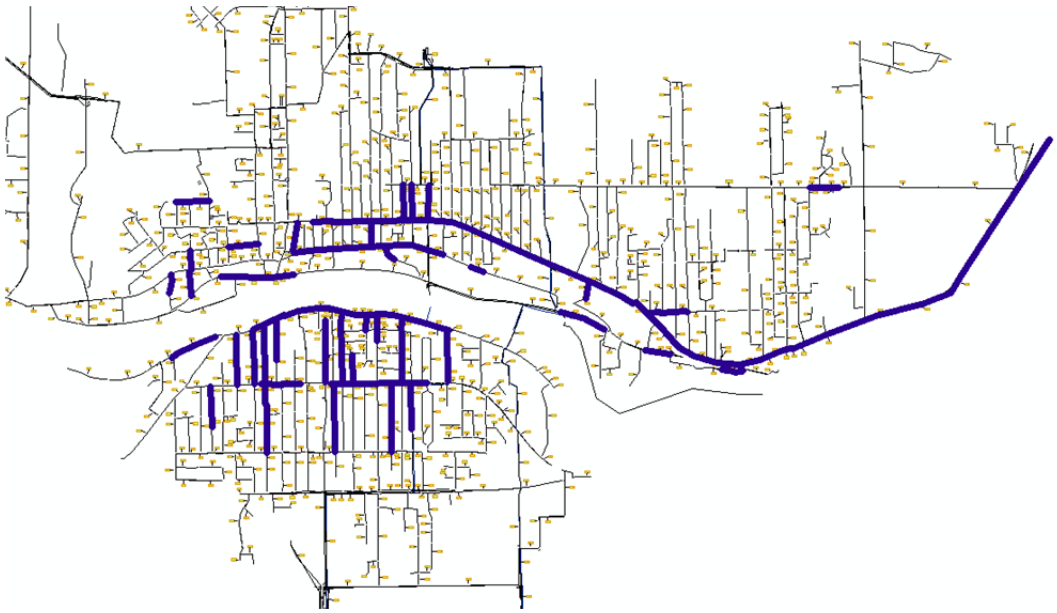


Figure 36 : Répartition des conduites remplacées de la ville de St-Georges.

Par cette méthode visuelle, dans certains cas, 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. Notons que 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.

7.5.2 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 St-Georges de valider ou de réfuter nos résultats selon leurs archives de données.

La Figure 37 et la Figure 38 présentent respectivement le linéaire de réseau cumulé, à chaque année, et le pourcentage du linéaire de conduites remplacées à chaque année, tels qu'évalués à partir des résultats obtenus par la méthode présentée dans ce rapport.

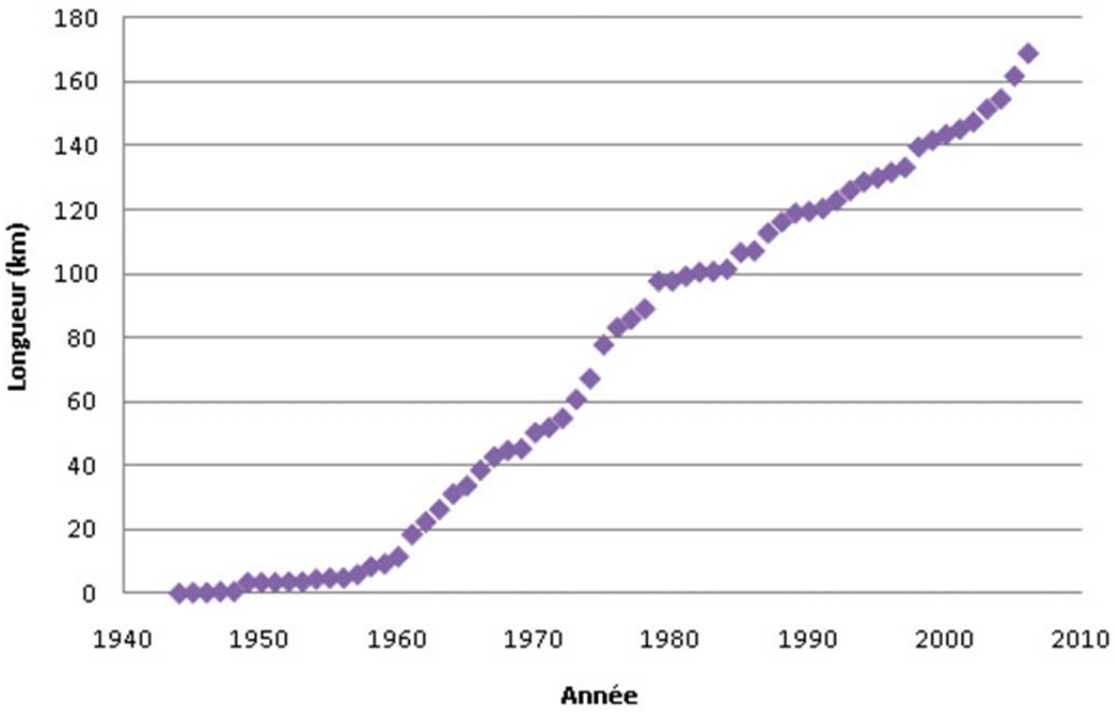


Figure 37 : Linéaire de réseau cumulé.

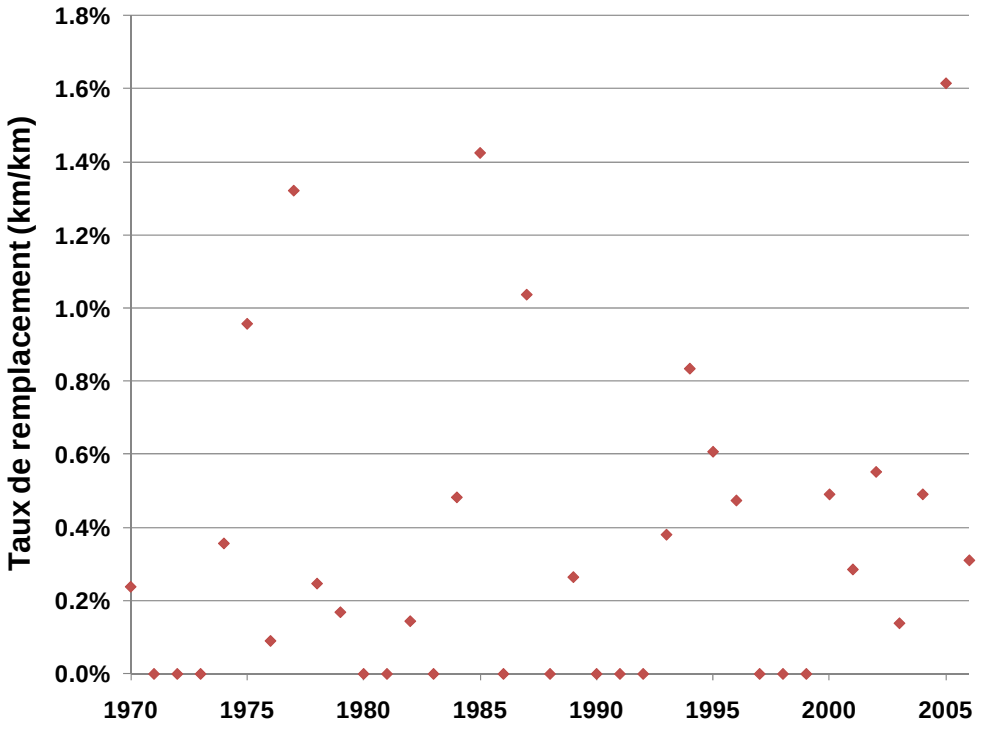


Figure 38 : Pourcentage du linéaire de réseau remplacé à chaque année.

7.6 Problèmes rencontrés : nouveaux quartiers

Parfois, de nouveaux tronçons se trouvent à l'extrémité de certains qui sont beaucoup plus âgés. Dans ces cas, il nous est parfois impossible de déterminer si ces conduites récentes forment un nouveau secteur ou bien si elles ont été remplacées.

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 est fondée sur les données de bris qui nous ont été fournies par la Ville de St-Georges. Sa valeur et sa qualité sont intimement liées à la précision et à la qualité des données qui nous ont été fournies.

8. Références bibliographiques

Alvisi, S. et M. Franchini (2010). Comparative analysis of two probabilistic pipe breakage models applied to a real water distribution system. *Civ Eng Environ Syst*, 27(1), 1-22.

Andreou, S.A., D.H. Marks et R.M. Clark (1987). A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Applications. *Adv Water Resour*, 10(1), 11-20.

Andreou, S.A., D.H. Marks et R.M. Clark (1987). A new methodology for modelling break failure patterns in deteriorating water distribution systems: Theory. *Adv Water Resour*, 10(1), 2-10.

Berardi, L., O. Giustolisi, Z. Kapelan et D.A. Savic (2008). Development of pipe deterioration models for water distribution systems using EPR. *J Hydroinf*, 10(2), 113-126.

Clark, R.M., R.G. Eilers et J.A. Goodrich (1988). Distribution System: Cost of Repair and Replacement. Dans : *Proceedings of the Conference on Pipeline Infrastructure*, ASCE, Boston, MA, 6-7 juin, pp. 428-440.

Clark, R.M. et J.A. Goodrich (1989). Developing a data base on infrastructure needs. *J Amer Water Works Ass*, 81(7), 81-87.

Clark, R.M., C.L. Stafford et J.A. Goodrich (1982). Water distribution systems: a spatial and cost evaluation. *J Water Resour Plan Manage Div ASCE*, 108(WR3), 243-256.

Davis, P., D. De Silva, D. Marlow, M. Moglia, S. Gould et S. Burn (2008). Failure prediction and optimal scheduling of replacements in asbestos cement water pipes. *J Water Supply Res Technol,* 57(4), 239-252.

Davis, P., M. Moglia, S. Gould et S. Burn (2004). Physical probabilistic models to estimate failure rates in PVC pipe networks. Dans : *Proceedings of World Water and Environmental Resources Congress 2004*, ASCE, Salt Lake City, UT, 27 juin-1er juillet, pp. 467-467.

Efron, B. (1979). Bootstrap methods: another look at the jackknife. *Ann Stat*, 7(1) : 1-26.

Eisenbeis, P. (1994), *Modélisation statistique de la prévision des défaillances sur les conduites d'eau potable*, Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France.

Hong, H.P., E.N. Allouche et M. Trivedi (2006). Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems. *J Infrastructure Systems*, 12(3), 184-191.

Hu, Y. et D.W. Hubble (2007). Factors contributing to the failure of asbestos cement water mains. *Can J Civ Eng*, 34(5), 608-621.

Kalbfleisch, J.D. et R. L. Prentice (2003). *The statistical analysis of failure time data*. J. Wiley, New York.

Kleiner, Y., A. Nafi et B.B. Rajani (2009). Planning renewal of water mains while considering deterioration, economies of scale and adjacent infrastructure. Dans : *Proceedings 2nd International Conference on Water Economics, Statistics and Finance, IWA Specialist Group Statistics and Economics*, Alexandroupolis, Grèce, 3 juillet, pp. 1-13.

Kleiner, Y. et B. Rajani (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban Water*, 3, 131-150.

Kleiner, Y., B.B. Rajani et S. Wang (2007). Consideration of static and dynamic effects to plan water main renewal. Dans : *Middle East Water 2007 - 4th International Exhibition and Conference for Water Technology,* Manama, Bahrain, 22 janvier, pp. 1-13.

Le Gat, Y. et P. Eisenbeis (2000). Using maintenance records to forecast failures in water networks. *Urban Water*, 2(3), 173-181.

Mailhot, A., A. Poulin et J.-P. Villeneuve (2003). Optimal replacement of water pipes. *Water Resour Res*, 39(5): 1136. doi:10.1029/2002WR001904.

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., A. Mailhot, and J.-P. Villeneuve (2003), Modeling water pipe breaks - Three case studies, *J Water Resour Planning Manage*, 129(2), 115-123.

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, Sainte-Foy, QC, Canada.

Rajani, B. et Y. Kleiner (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: Physically based models. *Urban Water*, 3(3), 151-164.

Schock, M.R. (1990). Internal corrosion and deposition control, Dans : *Water Quality and Treatment*, *4th ed.*, AWWA, McGraw Hill, New York, N.Y.

Su, S. (2007). Distributional modeling of pipeline leakage repair costs for a water utility company. *Am J Math Manage Sci.*, 27(3-4), 369-400.

Uni-Bell PVC Pipe Association (2011). Water Main Break Clock, http://www.watermainbreakclock.com (dernière consultation 27 juillet 2011).

Vanrenterghem-Raven, A. (2007). Water pipes asset management: Evaluation of EU CARE-W, Dans : *Proceedings of the 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium*, pp. 20.

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, Institut National de la Recherche Scientifique, Sainte-Foy, Québec, Canada.

Wang, Y., T. Zayed et O. Moselhi (2009). Prediction models for annual break rates of water mains. *J Perform Constr Facil,* 23(1), 47-54.

Yamijala, S., S.D. Guikema et K. Brumbelow (2009). Statistical models for the analysis of water distribution system pipe break data. *Reliab Eng Syst Safe*, 94(2), 282-293.

9. ANNEXES

9.1 Tableaux des bris simulés avec différents scénarios de remplacement

Tableau 12 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 0 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	74	74
2009	76	76
2010	78	78
2011	81	81
2012	83	83
2013	85	85
2014	87	87
2015	89	89
2016	91	91
2017	93	93
2018	96	96
2019	98	98
2020	100	100
2021	102	102
2022	104	104
2023	106	106
2024	108	108
2025	110	110
2026	112	112
2027	114	114
2028	116	116
2029	118	118
2030	120	120
2031	122	122
2032	123	123
2033	125	125

Tableau 13 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 0,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	73	74
2009	75	76
2010	76	78
2011	77	80
2012	79	82
2013	80	83
2014	82	85
2015	84	87
2016	85	89
2017	87	91
2018	88	92
2019	90	94
2020	91	96
2021	93	97
2022	94	99
2023	95	101
2024	96	102
2025	98	103
2026	99	105
2027	100	106
2028	102	108
2029	104	109
2030	105	111
2031	107	112
2032	108	113
2033	110	115

Tableau 14 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 1 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	72	73
2009	73	75
2010	74	77
2011	75	78
2012	76	80
2013	77	81
2014	78	83
2015	79	84
2016	80	85
2017	80	86
2018	82	88
2019	83	89
2020	85	90
2021	86	92
2022	87	92
2023	87	94
2024	87	95
2025	89	95
2026	90	97
2027	90	98
2028	90	98
2029	92	98
2030	92	99
2031	93	100
2032	94	101
2033	95	102

Tableau 15 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 1,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	71	73
2009	72	75
2010	72	76
2011	73	77
2012	73	78
2013	73	79
2014	74	80
2015	75	80
2016	76	82
2017	77	82
2018	76	83
2019	77	84
2020	77	85
2021	77	85
2022	78	85
2023	78	85
2024	79	86
2025	79	87
2026	79	87
2027	80	87
2028	79	86
2029	80	86
2030	81	87
2031	81	88
2032	83	88
2033	83	89

Tableau 16 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 2 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	71	73
2009	71	74
2010	71	75
2011	70	76
2012	70	76
2013	71	76
2014	71	77
2015	71	78
2016	71	78
2017	71	79
2018	71	78
2019	70	77
2020	71	78
2021	71	79
2022	70	78
2023	70	77
2024	71	77
2025	71	78
2026	72	77
2027	72	78
2028	72	79
2029	73	78
2030	72	76
2031	72	74
2032	72	73
2033	72	73

Tableau 17 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 2,5 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	70	73
2009	70	74
2010	69	74
2011	68	74
2012	69	74
2013	68	74
2014	67	74
2015	67	75
2016	66	73
2017	66	73
2018	65	73
2019	65	72
2020	64	71
2021	64	71
2022	65	71
2023	65	71
2024	64	72
2025	65	69
2026	64	67
2027	64	65
2028	63	64
2029	63	64
2030	63	64
2031	63	63
2032	63	63
2033	62	62

Tableau 18 : Bris simulés de 1987 à 2033 avec 3 % de remplacement.

Années	Scénario basé sur l'âge	Scénario basé sur nombre bris
1987	36	36
1988	37	37
1989	39	39
1990	40	40
1991	42	42
1992	44	44
1993	46	46
1994	48	48
1995	50	50
1996	51	51
1997	53	53
1998	55	55
1999	57	57
2000	59	59
2001	61	61
2002	63	63
2003	64	64
2004	66	66
2005	68	68
2006	70	70
2007	72	72
2008	70	73
2009	69	73
2010	67	73
2011	67	72
2012	66	72
2013	65	72
2014	63	71
2015	62	70
2016	62	70
2017	61	69
2018	60	67
2019	60	67
2020	60	66
2021	59	67
2022	60	64
2023	58	61
2024	57	59
2025	57	59
2026	57	58
2027	56	57
2028	56	56
2029	55	55
2030	54	54
2031	53	53
2032	53	52
2033	52	52

9.2 Développement du modèle *EEEStx*

Pour chaque conduite, on calcule la probabilité d'avoir *n* bris entre la date de l'installation (*t* = 0) et l'année d'observation *Ta* :

$$G(n) = \int_{t_1=0}^{Ta}\int_{t_2=t_1}^{Ta}\int_{t_3=t_2}^{Ta}\ldots\int_{t_n=t_{n-1}}^{Ta} f_1(t_1)k_2e^{\mathbf{x.\beta}}e^{-k_2(t_2-t_1)e^{\mathbf{x.\beta}}}k_3e^{\mathbf{x.\beta}}e^{-k_3(t_3-t_2)e^{\mathbf{x.\beta}}}\ldots k_3e^{\mathbf{x.\beta}}e^{-k_3(t_n-t_{n-1})e^{\mathbf{x.\beta}}}e^{-k_3(Ta-t_n)e^{\mathbf{x.\beta}}}dt_n\ldots dt_1$$

$$G(n) = \int_{t_1=0}^{Ta}\int_{t_2=t_1}^{Ta}\int_{t_3=t_2}^{Ta}\ldots\int_{t_n=t_{n-1}}^{Ta} f_1(t_1)k_2e^{\mathbf{x.\beta}}e^{-k_2(t_2-t_1)e^{\mathbf{x.\beta}}}(k_3e^{\mathbf{x.\beta}})^{n-2}e^{-k_3(Ta-t_2)e^{\mathbf{x.\beta}}}dt_n\ldots dt_1$$

$$G(n) = k_2e^{\mathbf{x.\beta}}(k_2e^{\mathbf{x.\beta}})^{n-2}e^{-k_3Tae^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)e^{k_2t_1e^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_3=t_2}^{Ta}\ldots\int_{t_n=t_{n-1}}^{Ta} dt_n\ldots dt_1$$

$$G(n) = k_2e^{\mathbf{x.\beta}}(k_3e^{\mathbf{x.\beta}})^{n-2}e^{-k_3Tae^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)e^{k_2t_1e^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x.\beta}}}\frac{(Ta-t_2)^{n-2}}{(n-2)!}dt_2dt_1$$

$$G(n) = \frac{k_2e^{\mathbf{x.\beta}}(k_3e^{\mathbf{x.\beta}})^{n-2}e^{-k_3Tae^{\mathbf{x.\beta}}}}{(n-2)!}\int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)e^{k_2t_1e^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x.\beta}}}(Ta-t_2)^{n-2}dt_2dt_1$$

La probabilité d'avoir un seul bris entre la date d'installation (*t* = 0) et la période d'observation *Ta* est donnée par :

$$G(1) = \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)F_2(Ta-t_1)dt_1$$

$$G(1) = \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)e^{-k_2(Ta-t_1)e^{\mathbf{x.\beta}}}dt_1$$

$$G(1) = e^{-k_2Tae^{\mathbf{x.\beta}}}\int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1)e^{k_2t_1e^{\mathbf{x.\beta}}}dt_1$$

Le nombre de bris moyen sur une conduite entre $t = 0$ et Ta est donné par :

$$\mu(Ta) = G(1) + \sum_{n=2}^{\infty} nG(n)$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = \sum_{n=2}^{\infty} n \frac{k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} (k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}})^{n-2} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}}}{(n-2)!} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} (Ta - t_2)^{n-2} dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n(k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}})^{n-2}}{(n-2)!} (Ta - t_2)^{n-2} dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \sum_{n=2}^{\infty} \frac{n}{(n-2)!} (k_3 (Ta - t_2) e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}})^{n-2} dt_2 dt_1$$

Soit $x = k_3(Ta - t_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}$ et $p = n - 2$, on a :

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \sum_{p=0}^{\infty} \frac{(p+2)}{p!} x^p dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \left(\sum_{p=1}^{\infty} \frac{x^p}{(p-1)!} + 2\sum_{p=0}^{\infty} \frac{x^p}{p!}\right) dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \left(x\sum_{p=1}^{\infty} \frac{x^{p-1}}{(p-1)!} + 2e^x\right) dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \left(x\sum_{p=1}^{\infty} \frac{x^{p-1}}{(p-1)!} + 2e^x\right) dt_2 dt_1$$

On pose p' = p-1, ce qui donne :

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \left(x\sum_{p'=0}^{\infty} \frac{x^{p'}}{p'!} + 2e^x\right) dt_2 dt_1$$

D'où :

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} (xe^{x} + 2e^{x}) dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} e^{-k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{t_2(k_3-k_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} (k_3(Ta-t_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} + 2) e^{k_3(Ta-t_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_2=t_1}^{Ta} e^{-k_2 t_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} (k_3(Ta-t_2)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} + 2) dt_2 dt_1$$

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = k_2 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \left((\frac{k_3}{k_2} - 2) e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} + (2 + k_3(Ta-t_1)e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} - \frac{k_3}{k_2}) e^{-k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \right) dt_1$$

Après quelques simplifications nous obtenons :

$$\sum_{n=2}^{\infty} nG(n) = (\frac{k_3}{k_2} - 2) e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_1 + (\frac{k_3}{k_2} - 2) F_1(Ta) + \left(2 - \frac{k_3}{k_2} + k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \right) - k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \int_{t_1=0}^{Ta} F_1(t_1) dt_1$$

Il s'ensuit que :

$$\mu(Ta) = \sum_{n=1}^{\infty} nG(n) = G(1) + \sum_{n=2}^{\infty} nG(n)$$

$$= e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_1 + (\frac{k_3}{k_2} - 2) e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_1$$

$$+ (\frac{k_3}{k_2} - 2) F_1(Ta) + \left(2 - \frac{k_3}{k_2} + k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \right) - k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} \int_{t_1=0}^{Ta} F_1(t_1) dt_1$$

Soit :

$$Int1 = \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_1 \qquad Int2 = \int_{t_1=0}^{Ta} F_1(t_1) dt_1$$

On obtient alors :

$$\mu(Ta) = \sum_{n=1}^{\infty} nG(n) = G(1) + \sum_{n=2}^{\infty} nG(n)$$
$$= e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} Int1 + (\frac{k_3}{k_2} - 2) e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} Int1 + (\frac{k_3}{k_2} - 2) F_1(Ta) + \left(2 - \frac{k_3}{k_2} + k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}\right) - k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} Int2$$

On procède à certaines simplifications :

$$\mu(Ta) = (\frac{k_3}{k_2} - 1) e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} Int1 - k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} Int2 + k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} + (\frac{k_3}{k_2} - 2)(F_1(Ta) - 1)$$

Finalement, on obtient l'expression simplifiée du nombre moyen cumulé de bris sur une conduite entre 0 et *Ta* :

$$\mu(Ta) = (\frac{k_3}{k_2} - 1)\left(e^{-k_2 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} Int1\right) - k_3 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} Int2 + k_3 Tae^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}} + (\frac{k_3}{k_2} - 2)\left(F_1(Ta) - 1\right)$$

où :

$$Int1 = \int_{t_1=0}^{Ta} f_1(t_1) e^{k_2 t_1 e^{\mathbf{x}.\boldsymbol{\beta}}} dt_1 \qquad Int2 = \int_{t_1=0}^{Ta} F_1(t_1) dt_1$$

9.3 Fichiers joints à ce rapport

9.3.1 Excel

- ✓ FuitesSGT.xls : Fichier des bris de 1987 à 2006.
  - o Fuites : Base de données des bris de 1987 à 2006, telle que reçue de la Ville de St-Georges.
  - o Fuites sans #civique : Toutes les fuites sans numéro civique.
  - o Fuites coin de rue : Toutes les fuites identifiées par des coins de rue.
  - o Fuites avec #civique : Toutes les fuites identifiées avec des numéros civiques.
  - o Fuites avec description de lieu : Toutes les fuites identifiées avec des descriptions de lieu.
  - o FuitesRépertoriéesComplet : Résumé de toutes les fuites qui ont été liées à un numéro de conduite du plan d'intervention. Ce sont ces fuites qui ont été intégrées au modèle de prédiction.

- ✓ ModeleSGT_MiseEnForme.xls : Base de données de la ville de St-Georges contenant toutes les conduites d'aqueduc, leurs caractéristiques intrinsèques, leurs bris par ordre chronologique (1987-2006), leur date de remplacement estimée comme expliqué au chapitre 7, etc. Nous incluons aussi, pour chaque conduite, des données sur le type de sol dans lequel elles sont enfouies. C'est cette base de données qui est utilisée comme donnée d'entrée du modèle mathématique de prédiction des taux de bris.

9.3.2 ArcGIS

- ✓ Aqueduc1.shp; Aqueduc2.shp; Aqueduc3.shp; Aqueduc4.shp; Aqueduc5.shp; Aqueduc6.shp; Aqueduc7.shp; Aqueduc8.shp; Aqueduc_detail.shp; Aqueduc_Deco.shp : Tous ces fichiers permettent de visualiser le réseau d'aqueduc de la ville de St-Georges.

- ✓ Numero_PI_Aqueduc.shp : Chaque conduite est associée à un numéro du plan d'intervention. C'est ce numéro qui est utilisé également pour les fuites.

- ✓ Info_Detail_Conduite.shp; Info_Detail_Conduite2.shp; Info_Aqueduc.shp : Ces couches comprennent des informations sur les conduites telles que le matériau, l'année de la pose ainsi que le diamètre.

- ✓ ConduitesRemplacees.shp : Fichier « shape » de la couche des conduites répertoriées comme ayant été remplacées, selon la méthode décrite dans ce rapport. Il est suggéré de visualiser cette couche en modifiant l'épaisseur des lignes. En étant plus larges, il est plus facile de voir les différences avec les conduites déjà en place, comme à la Figure 36.

9.4 Résultat d'analyse par tomodensitométrie d'un tuyau d'eau potable

La tomodensitométrie volumétrique (*CT Scan*) fournit, comme résultat, des images couleur représentant des niveaux de coefficients d'atténuation linéaire des rayons X quand ils atteignent le tuyau numérisé. Les coefficients mesurés par les capteurs dépendent de la densité du matériau (la fonte, dans ce cas précis). La Figure 39 montre un exemple d'une coupe transversale du tuyau reçu de la Ville de St-Georges, numérisé avec le tomodensitomètre disponible au laboratoire de l'INRS (*Siemens Somatom Volume Access*). Les faibles valeurs des coefficients d'atténuation (couleur bleue) représentent l'air ainsi que les imperfections dans la paroi du tuyau, tandis que les valeurs élevées (orange, rouge) représentent un matériau dense (fonte). Comme le montre cette même figure, la paroi du tuyau est facilement identifiable à partir de cette coupe transversale fournie par la tomodensitométrie.

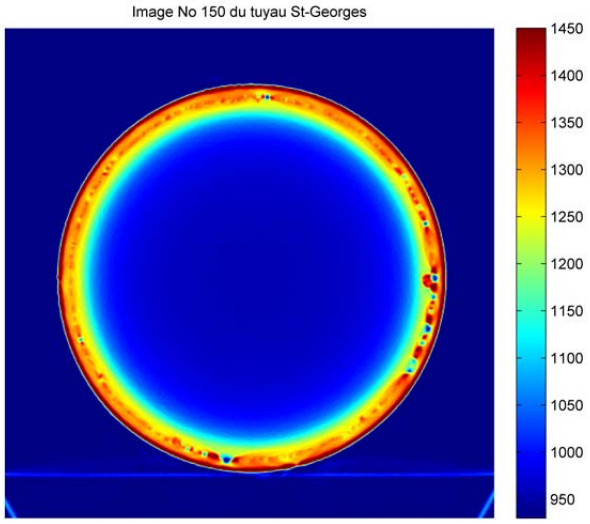


Figure 39 : Coupe transversale de la numérisation d'un tuyau de la Ville de St-Georges.

Nous avons développé des algorithmes informatiques permettant d'estimer le pourcentage de perte de paroi à partir des images fournies par la numérisation; images qui donnent les coefficients d'atténuation à l'intérieur de la paroi et sur toute la longueur du tuyau numérisé. L'idée principale est de produire une représentation déroulée du tuyau sous forme d'une matrice, qu'on appellera Image-Plan. Cette image contient les moyennes des valeurs des points à travers la paroi du tuyau autour de la circonférence et sur toute sa longueur (voir Figure 40).

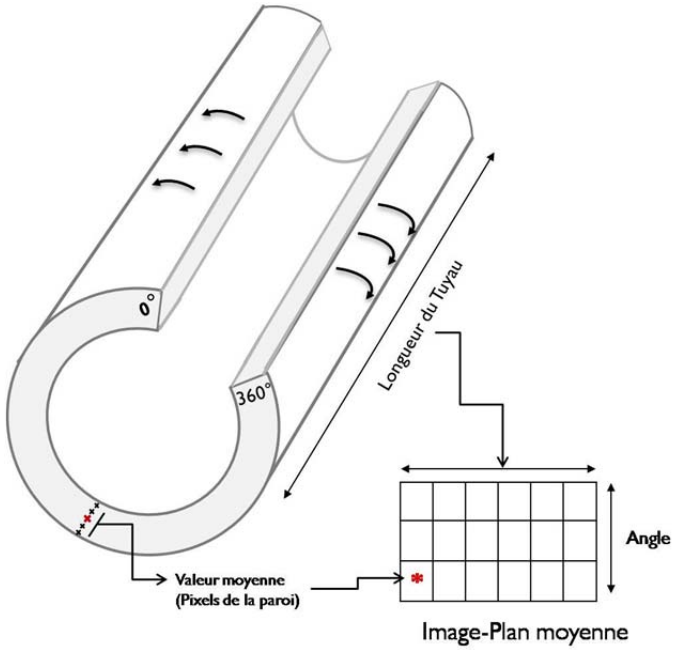


Figure 40 : Illustration du principe du déroulement du tuyau pour la création de l'Image-Plan.

La Figure 41 montre l'Image-Plan du tuyau reçu de St-Georges. On constate, sur cette figure, que des pertes d'épaisseur de paroi (taches bleues et vertes) sont visibles et concentrées sur trois zones différentes :

- entre les images 0 à 150 (de 0 à 105 mm).
- entre les images 300 à 400 (de 210 à 280 mm).
- entre les images 910 et 1 010 (de 637 à 707 mm).

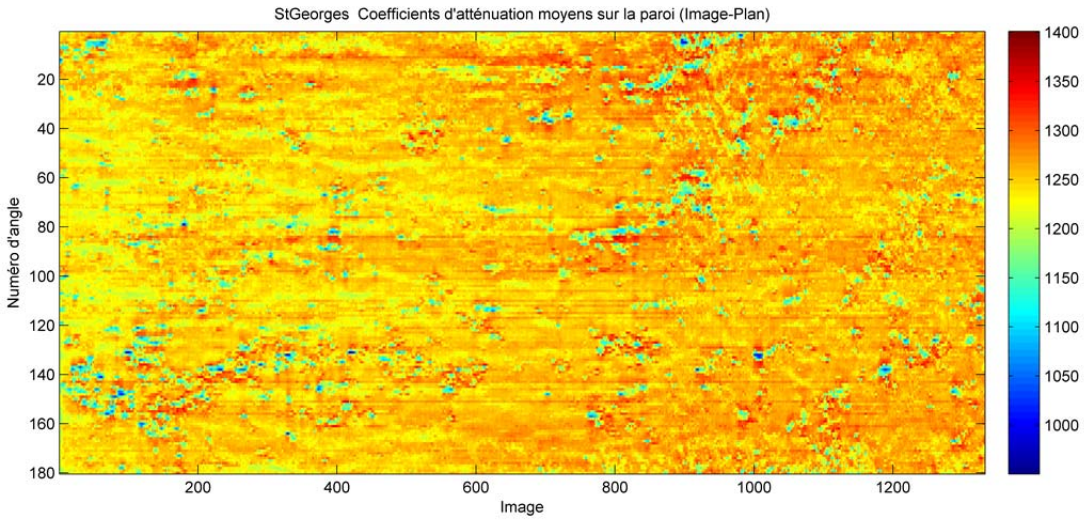


Figure 41 : Exemple de l'Image-Plan pour le tuyau-échantillon de St-Georges.

L'algorithme développé pour estimer le pourcentage de perte d'épaisseur de paroi choisit comme repère une bande de 100 mm de long et 360° de circonférence. Cet algorithme nous a renvoyé comme résultat les observations suivantes :

- à 105 mm, une perte de paroi d'environ 25 % couvrant 13 % de la zone de 100 mm × 360°;
- à 274 mm, une perte de paroi d'environ 23 % couvrant 13 % de la zone de 100 mm × 360°;
- à 637 mm, une perte de paroi d'environ 26 % couvrant 13 % de la zone de 100 mm × 360°.

En résumé, il existe trois zones de corrosion pour lesquelles on observe environ 25 % de perte de paroi. Nous estimons qu'il y a quelques imperfections de corrosion dans la paroi du tuyau, mais qu'il n'y a pas de corrosion majeure (interne ni externe).