

**MODÉLISATION DE LA
CORROSION DES CONDUITES
D'EAU POTABLE EN FONTE DE
LA VILLE DE QUÉBEC**

Rapport de recherche No R-1314

Février 2012

**MODÉLISATION DE LA CORROSION DES CONDUITES D'EAU POTABLE EN FONTE
DE LA VILLE DE QUÉBEC**

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

Sophie Duchesne
Nabila Bouzida
Naoufel Chahid
Jean-Pierre Villeneuve

Février 2012

INRS
Université d'avant-garde

Canada 

Québec 

REMERCIEMENTS

Les auteurs de ce rapport remercient les gouvernements du Québec et du Canada pour leur appui financier à ce projet dans le cadre du Fonds sur l'infrastructure municipale rurale (FIMR), volet 2, qui est géré par le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). Ils remercient également la Ville de Québec pour son appui financier. Ce rapport a été réalisé dans le but de développer un modèle de prédiction de la corrosion des conduites d'eau potable en fonte à partir de résultats d'auscultations par la méthode du champ lointain. La réalisation du rapport a été pilotée par l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS, équipe de la professeure Sophie Duchesne), pour la municipalité de Québec.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE	XI
1. INTRODUCTION	1
2. PROBLÉMATIQUE	3
2.1 Corrosion : principes et définitions	3
2.2 Corrosion des conduites d'aqueduc en fonte	5
2.2.1 Différents types de corrosion des conduites en fonte	7
2.2.2 Effet des caractéristiques du sol sur la détérioration des conduites	10
2.2.3 Le TAS, un indice pour caractériser l'agressivité du sol	12
2.3 Modélisation mathématique de la profondeur de corrosion	14
2.3.1 Modèles généraux	14
2.3.2 Modèles appliqués aux conduites enfouies	14
2.3.3 Conclusion	17
3. OUTILS ET DONNÉES	19
3.1 Données disponibles en début de projet	19
3.1.1 Réseau d'aqueduc de la Ville de Québec	19
3.1.2 Caractéristiques du sol	20
3.1.3 Mesures de corrosion sur certaines conduites	21
3.2 Validation de la technique Aqua Diag	23
3.3 Campagnes d'échantillonnage	24
3.3.1 Planification des campagnes	24
3.3.2 Analyse préliminaire des données	26
4. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE MATHÉMATIQUE DE CORROSION DES CONDUITES D'EAU POTABLE EN FONTE POUR LA VILLE DE QUÉBEC	31
4.1 Identification des caractéristiques du sol au voisinage des conduites auscultées	31
4.2 Corrélations entre la profondeur de corrosion et divers facteurs potentiellement explicatifs	33
4.3 Principes généraux du modèle	39
4.4 Résultats	40
4.4.1 Modèle calculant la probabilité d'avoir une perte maximale de 100 % en fonction de l'âge	40
4.4.2 Modèle pour les conduites n'ayant pas de bris observé lors de l'auscultation	42
4.4.3 Mise en commun des deux modèles	46

5. CONCLUSION	49
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	51
ANNEXE 1 – VALIDATION DE LA TECHNIQUE AQUA DIAG	55

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Processus de corrosion du fer (tiré de Le, 2008).	4
Figure 2. Paramètres qui contribuent à l'affaiblissement des conduites d'eau (tiré de Blindu, 2004; adapté de O'Day <i>et al.</i> , 1989).	6
Figure 3. Quelques formes de corrosion les plus répandues sur les conduites métalliques (adapté de Roberge, 1999).	9
Figure 4. Distribution des conduites par classes d'âge et de matériau, selon les données fournies par la Ville de Québec.	20
Figure 5. Localisation des échantillons de sol analysés.	21
Figure 6. Exemple de résultat d'inspection.	22
Figure 7. Localisation des conduites auscultées de 2003 à 2006.	22
Figure 8. Répartition des matériaux selon la longueur totale des conduites.	25
Figure 9. Distribution des conduites auscultées par groupe d'âge.	27
Figure 10. Carte des taux de corrosion (mm/an).	29
Figure 11. Profondeur maximale de corrosion en fonction de l'âge des conduites à l'auscultation.	30
Figure 12. Taux de corrosion en fonction du pH du sol.	34
Figure 13. Taux de corrosion en fonction du potentiel redox du sol.	34
Figure 14. Taux de corrosion en fonction de la résistivité du sol.	35
Figure 15. Taux de corrosion en fonction du taux d'agressivité du sol (TAS).	35
Figure 16. Profondeur de corrosion observée en fonction de l'âge de la conduite auscultée pour les conduites installées depuis 1960.	38
Figure 17. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm de la ville de Québec d'avoir connu une perte maximale de paroi de 100 % en fonction de son âge.	42
Figure 18. Fonctions de distribution de la perte de paroi pour des conduites de 20 ans et de 50 ans, selon le modèle GEV tenant compte de l'âge des conduites, pour les conduites sur lesquelles aucune réparation n'a été détectée.	45
Figure 19. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm de la ville de Québec d'avoir une perte de paroi par corrosion supérieure à z %, pour des conduites de 20, 30, 40 et 50 ans.	47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Les causes et facteurs physiques et environnementaux qui peuvent être à l'origine de la dégradation de la structure des conduites d'eau potable (tiré de Fédération canadienne des municipalités et Conseil national de recherches du Canada, 2002).	7
Tableau 2. Classification de la corrosivité des sols selon la résistivité (tiré de O'Day, 1989). ...	11
Tableau 3. Grille d'évaluation du taux d'agressivité du sol selon le standard ANSI/AWWA C-105/A21.5-99 (adapté de Doyle, 2000).	13
Tableau 4. Bilan des activités d'auscultation de conduites d'aqueduc.	26
Tableau 5. Nombre de conduites de 150 mm pour lesquelles les caractéristiques du sol ont pu être estimées.	33
Tableau 6. Coefficient de corrélation linéaire entre la perte de paroi observée lors de l'auscultation et divers facteurs potentiellement explicatifs.....	37
Tableau 7. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm à Québec de présenter une perte de paroi par corrosion supérieure à 80 %.....	47
Tableau 8. Bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 50 % de la perte de paroi en fonction de l'âge d'une conduite en fonte de 150 mm à Québec.....	48

SOMMAIRE

L'objectif principal du projet faisant l'objet de ce rapport était de développer un modèle mathématique pour prédire l'évolution de l'épaisseur résiduelle des conduites d'aqueduc en fonte, à partir d'informations recueillies à l'aide de la sonde Aqua Diag. Ce projet s'est divisé en quatre volets qui sont : 1) la validation en laboratoire des résultats fournis par la sonde Aqua Diag; 2) la récolte et la mise en forme des données disponibles à la Ville de Québec pour le développement du modèle; 3) la planification de campagnes d'inspection supplémentaires afin d'accroître le volume de données disponibles; et 4) la mise en place du modèle mathématique. Les résultats du premier volet ont fait l'objet d'un premier rapport, reproduit en annexe, tandis que les volets 2 à 4 sont détaillés dans le présent rapport.

La principale conclusion du premier volet est que l'inspection de conduites d'aqueduc en fonte, par la sonde Aqua Diag, donne une bonne représentation de l'état général de dégradation par corrosion de ces conduites. Ce résultat permet de s'appuyer sur les estimations de profondeur de corrosion fournies par la sonde Aqua Diag pour développer un modèle de prédiction de l'évolution de la corrosion sur les conduites en fonte. Le second volet a conduit à la construction d'une base de données qui regroupe toutes les informations existantes afin de mieux comprendre le processus de corrosion sur les conduites d'eau potable de la Ville de Québec, soit les informations concernant les caractéristiques des conduites d'aqueduc (localisation, âge, etc.), les résultats d'auscultations Aqua Diag (nombre de défauts observés, perte maximale de paroi par corrosion, etc.) et les caractéristiques du sol (pH, résistivité, etc.). Quant au troisième volet, il a permis de réaliser des inspections par la sonde Aqua Diag de 36 conduites sur le territoire de la ville de Québec, dont les résultats se sont ajoutés aux 276 résultats d'inspection disponibles en début de projet, afin de construire le modèle de prédiction de l'évolution de la corrosion. Ainsi, ces données ont servi de base pour le développement, dans le cadre du quatrième volet, d'un modèle probabiliste qui donne, pour une conduite en fonte d'un diamètre de 150 mm et en fonction de son âge, la probabilité que la profondeur de corrosion sur cette conduite soit supérieure à une valeur donnée. En raison de la nature des données disponibles, les caractéristiques du sol n'ont pas pu être intégrées à ce modèle; ceci le rend d'ailleurs plus facile à adapter pour les réseaux d'autres municipalités, car la connaissance

détaillée de la distribution spatiale des caractéristiques du sol est une information rarement disponible en milieu urbain.

1. Introduction

La corrosion est un des principaux processus qui contribuent à la rupture des conduites d'eau potable en fonte (Agbenowosi, 2000; Rajani *et al.*, 2000). Or, bien que le PVC (polychlorure de vinyle) soit actuellement le matériau le plus utilisé pour les nouvelles conduites d'eau potable installées en Amérique du Nord, la majorité des conduites de petits diamètres qui ont été installées jusque dans les années 1990 est constituée de fonte (grise ou ductile). À titre d'exemple, à Québec, 72 % des conduites d'aqueduc, dont le matériau est connu, sont des conduites de fonte. Dans ce contexte, la mise en place d'un modèle pour estimer les profondeurs de corrosion dans les conduites en fonte, et donc l'épaisseur résiduelle de la paroi de ces conduites, permettrait d'améliorer les outils d'aide à la planification du renouvellement des conduites d'aqueduc.

Par ailleurs, la Ville de Québec a procédé, de 2003 à 2006, à l'auscultation de 276 conduites en fonte, afin de déterminer l'épaisseur résiduelle de leur paroi. Les données issues de ces auscultations sont une mine d'information précieuse pour la mise en place d'un modèle de corrosion. En mai 2009, le démarrage d'un projet financé par le fonds FIMR-2 et la Ville de Québec (projet #612450) a permis d'ausculter 36 conduites supplémentaires, de colliger des informations sur les types de sol et de compléter diverses analyses ayant mené à la proposition d'un modèle de corrosion pour les conduites en fonte. Ce rapport présente la méthodologie et les principaux résultats de ce projet. On présente d'abord, au Chapitre 2, la problématique générale de la corrosion ainsi qu'une revue des différents modèles mathématiques existants pour estimer les profondeurs de corrosion. Au Chapitre 3, les données disponibles et les campagnes d'auscultation réalisées au cours du projet seront décrites en détails. Le chapitre suivant (Chapitre 4) présente les résultats des différentes analyses réalisées et propose un nouveau modèle pour l'estimation des profondeurs de corrosion des conduites en fonte.

2. Problématique

La corrosion externe est un des principaux processus qui contribuent à la rupture des conduites d'eau potable en fonte (Agbenowosi, 2000; Rajani *et al.*, 2000). Ce phénomène apparaît sur les conduites en fonte (grise ou ductile) dans des endroits où le sol avoisinant est jugé agressif et/ou en présence de courants vagabonds. La corrosion affaiblit localement la structure des conduites et peut mener à leur rupture lorsque les zones affaiblies par la corrosion sont soumises à un stress intérieur ou extérieur (ex. : charge excessive en surface, variation rapide de pression, etc.). Nous présenterons d'abord dans ce chapitre (section 2.1) les principaux concepts associés à la corrosion, puis préciserons les éléments qui sont plus particulièrement liés à la corrosion des conduites d'aqueduc en fonte (section 2.2). Enfin, une revue des modèles existants pour estimer les profondeurs de corrosion est présentée à la section 2.3.

2.1 Corrosion : principes et définitions

La corrosion est une action destructrice qu'exerce le milieu ambiant sur les conduites métalliques. Elle est la résultante d'un processus d'échange et de déplacement d'ions qui se produit soit entre deux sites de la conduite ayant des potentiels différents (anode et cathode), soit entre le sol et la paroi externe de la conduite. Il a été prouvé que les conduites enfouies dans des sols avec des caractéristiques non homogènes tendent à se corroder plus vite à cause du déplacement des charges qui se fait plus aisément entre les différents sites. L'anode et la cathode sont des sites du métal qui présentent un potentiel électrochimique différent; la connexion électrique est assurée par le métal. Le sol ou l'eau servent de solution électrolyte (voir Figure 1).

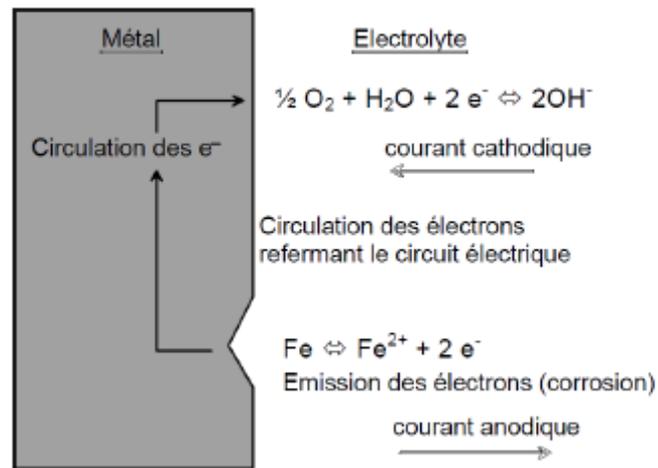


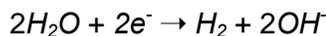
Figure 1. Processus de corrosion du fer (tiré de Le, 2008).

La corrosion électrochimique d'un métal dans un sol résulte de l'activité de piles, d'où le terme de pile de corrosion. La corrosion électrochimique est une oxydation de ce métal. Les électrons libérés induisent nécessairement une réduction dans un autre site du métal. Il y a donc des zones d'oxydation et des zones de réduction entre lesquelles circulent des ions et des électrons. Ces zones se forment à la surface du métal et correspondent donc à un système d'oxydoréduction. Lors de la formation d'une pile de corrosion, le métal le plus réducteur s'oxyde. Les deux phénomènes qui contribuent à la formation de piles de corrosion sont alors :

1. Le phénomène d'oxydation, qui est l'équivalent d'une perte d'électrons; cela veut dire que le métal perd des ions de fer et libère des électrons ($2e^-$). Ce processus peut se traduire par la formule chimique suivante :



2. Le phénomène de réduction du solvant, qui est l'équivalent d'une perte de degré d'oxydation et gain d'électrons. Ce processus peut se traduire par la formule chimique suivante :



Ainsi, pour qu'une réaction de corrosion électrochimique se forme, les éléments suivants doivent être présents (Romer *et al.*, 2005) :

1. Un site cathodique : l'électrode d'une cellule électrochimique à laquelle la réduction est la réaction principale. Les électrons se dirigent vers la cathode dans le circuit externe. Les dommages ne s'accumulent généralement pas à la cathode.
2. Un site anodique : l'électrode d'une cellule électrochimique à laquelle l'oxydation se produit. Les électrons quittent l'anode dans le circuit externe. La corrosion s'y produit habituellement et les ions de métal pénètrent la solution à l'anode et l'endommagent.
3. Un électrolyte : c'est un environnement chimique (ex. : humidité dans le sol) contenant les ions qui se déplacent dans un champ électrique.
4. Une solution ou chemin connectant l'anode et la cathode : c'est un chemin métallique reliant électriquement l'anode et la cathode ou les secteurs anodiques et les secteurs cathodiques. Les électrons sont libérés par l'anode par la réaction d'oxydation et y sont transportés vers la cathode pour être consommés dans la réaction de réduction. Un exemple de chemin électrolytique est le métal d'une conduite qui est formé de plusieurs sites métalliques ayant des potentiels différents.

2.2 Corrosion des conduites d'aqueduc en fonte

La corrosion des conduites souterraines est une forme de détérioration des métaux les composant, qui se développe suite aux différentes réactions chimiques, biologiques et mécaniques exercées par les composantes du sol environnant. La corrosion des conduites en fonte, enfouies dans le sol, est un phénomène complexe à analyser à cause des différents paramètres qui contribuent à sa formation. Plusieurs auteurs (Agbenowosi, 2000; O'Day, 1989; Rajani *et al.*, 2000) ont affirmé que la corrosion externe est la cause principale de la détérioration structurale des conduites métalliques. Ce phénomène joue un rôle majeur dans la rupture des conduites d'eau potable, comparativement à la corrosion interne qui est provoquée par les caractéristiques de l'eau, le débit, la pression, etc. Selon plusieurs auteurs, dont Seica (2002), la rupture des conduites d'aqueduc serait très peu souvent attribuable à la corrosion interne.

Les conditions environnementales induisent la formation de cellules électrochimiques qui encouragent l'apparition de puits de corrosion sur des conduites en fonte ductile et des zones

de graphitisation sur des conduites en fonte grise. Dans un matériau comme la fonte grise, la plus grande partie du carbone est présente sous forme de réseau continu de plaquettes de graphite lamellaire facilitant la propagation des fissures. La graphitisation est un phénomène que la fonte grise subit lorsqu'elle perd des ions de fer qui se déplacent et s'accrochent à d'autres sites cathodiques (moins anodiques). Il n'en résulte que le produit de corrosion, composé d'un réseau de graphite, d'oxyde de fer et de quelques éléments du milieu environnant. La difficulté avec ce genre de détérioration est que, bien que la conduite garde sa structure ou sa forme intacte, sa résistance devient beaucoup plus faible. Contrairement à la fonte grise, la morphologie sphérique des particules de graphite dans la fonte ductile la rend plus résistante aux fissures de corrosion.

L'épaisseur de la paroi d'une conduite qui se corrode diminue dans le temps; la paroi devient ainsi de plus en plus fragile. Elle perd sa capacité de supporter les forces résultantes environnantes et s'affaiblit, se perce, ou rompt tout simplement. Une pression d'eau interne suffit pour éliminer le matériau résiduel. La Figure 2 illustre un exemple des causes d'affaiblissement des conduites d'eau potable, alors que le Tableau 1 présente les principaux facteurs qui peuvent déclencher cette dégradation de la structure.

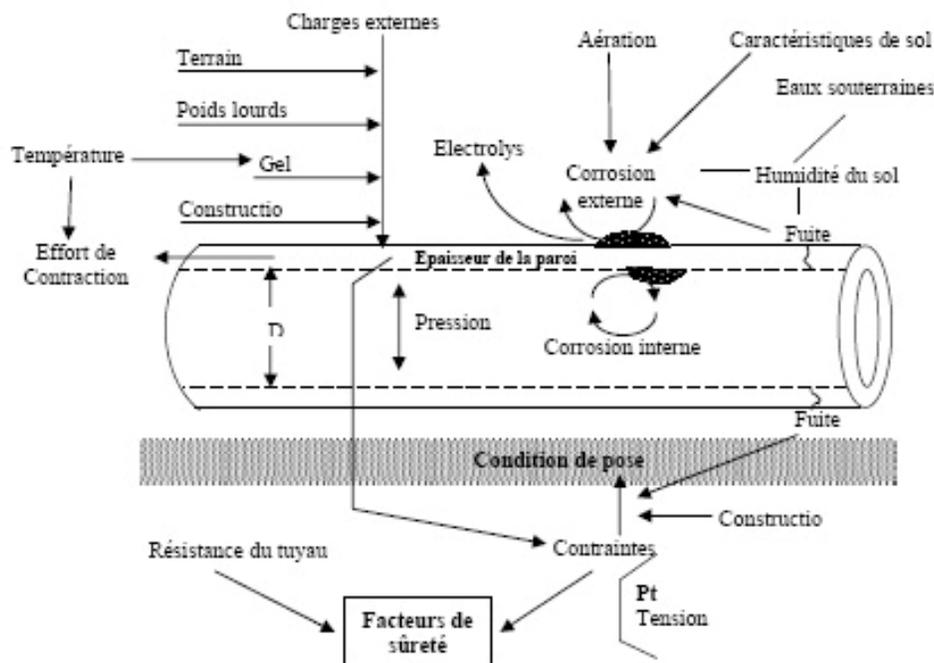


Figure 2. Paramètres qui contribuent à l'affaiblissement des conduites d'eau (tiré de Blindu, 2004; adapté de O'Day *et al.*, 1989).

Tableau 1. Les causes et facteurs physiques et environnementaux qui peuvent être à l'origine de la dégradation de la structure des conduites d'eau potable (tiré de Fédération canadienne des municipalités et Conseil national de recherches du Canada, 2002).

	Facteurs	Explications
Physique	Matériau	La nature de la défaillance varie selon le matériau du tuyau.
	Épaisseur de paroi	La corrosion traverse plus rapidement une paroi moins épaisse.
	Âge du tuyau	Les effets de la dégradation du tuyau deviennent plus visibles avec l'âge.
	Revêtements	Les tuyaux munis d'un revêtement sont moins sensibles à la corrosion.
	Époque de fabrication	L'époque et l'endroit de fabrication d'un tuyau peuvent avoir une incidence sur sa vulnérabilité à la défaillance.
	Diamètre du tuyau	Les tuyaux de petit diamètre sont plus sensibles à une défaillance au niveau du cylindre.
	Pose et fabrication	De mauvaises pratiques lors de la pose des tuyaux et la présence d'imperfections lors de la fabrication.
Environnement	Type de sol	Certains sols sont corrosifs pour les conduites qui y sont enfouies.
	Climat	Le climat a une influence sur la pénétration du gel et l'humidité du sol.
	Charges et mouvements	Les mouvements souterrains dans l'environnement immédiat du tuyau peuvent modifier sa structure de soutien.
	Courants électrolytiques	Les courants vagabonds provoquent la corrosion électrolytique.

2.2.1 Différents types de corrosion des conduites en fonte

Plusieurs types de corrosion peuvent attaquer les conduites métalliques souterraines, notamment la corrosion galvanique, électrolytique, par piqûres et celle causée par des bactéries. Ces différentes formes de corrosion sont détaillées aux sections suivantes.

2.2.1.1 La corrosion galvanique ou bi-métallique

Les conduites métalliques souterraines qui sont composées de métaux différents sont susceptibles à des attaques sous forme de corrosion galvanique. La vitesse de corrosion d'un métal augmente lorsqu'il est en contact avec un matériau plus noble. Par exemple, si le fer est couplé avec un métal plus noble, comme le cuivre, sa corrosion va augmenter; par contre, si le fer est couplé avec un métal moins noble, comme le zinc, c'est ce dernier qui se corrodera et qui se sacrifiera en limitant de ce fait la corrosion du fer (Dabosi *et al.*, 1994). C'est ce qu'on appelle l'anode sacrificielle, ou protection cathodique, utilisée pour protéger des courants corrosifs les métaux constituant les conduites.

2.2.1.2 La corrosion localisée ou piquetée (pitting corrosion)

La corrosion piquetée ou localisée est caractérisée par une attaque très localisée évoquant une piqûre (trou, *pit* en anglais) (Dabosi *et al.*, 1994). C'est l'une des formes de corrosion les plus fréquemment observées sur les conduites en fonte et elle apparaît sous forme de petits secteurs ou cavités. Sur les conduites en fonte ductile par exemple, les puits de corrosion peuvent perforer profondément le métal et, par conséquent, entraîner sa rupture. En général, ces cavités sont initialement petites et isolées et apparaissent sous forme de piqûres sur des surfaces du métal qui sont plus anodiques. Dans ce cas, ce phénomène peut se produire lorsque le métal de la conduite présente des hétérogénéités. De plus, les sols avec des concentrations élevées de chlorures et de sulfates peuvent causer ces cavités de corrosion. Dès que cette piqûre est lancée, une cellule active de corrosion est formée, dans laquelle la dissolution rapide du métal produit des charges métalliques positives qui vont hydrolyser et former des ions d'hydrogène. Ces derniers vont affecter le pH dans ce site parce qu'ils vont se combiner avec les électrons libérés par le métal à l'anode pour former de l'hydrogène. Par conséquent, la cavité devient plus acide. Lorsque les piqûres sont initiées, elles deviennent auto-catalytiques¹ et vont continuer de se développer même si la source de la piqûre est éliminée (NRCNA, 2009).

2.2.1.3 La corrosion par effet de crevasse (crevice corrosion)

La corrosion par effet de crevasse, aussi appelée corrosion caverneuse, est un phénomène de corrosion localisée qui se développe dans des interstices, des joints ou des zones de recoin où

¹ Une réaction auto-catalytique est une réaction chimique dont le catalyseur figure parmi les produits de la réaction. En chimie, un catalyseur est une substance qui augmente ou ralentit la vitesse d'une réaction chimique; il participe à la réaction, mais est régénéré à la fin de la réaction.

un matériau métallique se trouve localement en contact avec un milieu corrosif confiné (Dabosi *et al.*, 1994). L'oxydation se produit dans la crevasse, alors que les réactions de réduction (diminution des états d'oxydation) se produisent sur les surfaces du métal à l'extérieur de la crevasse.

2.2.1.4 La corrosion graphitique

La fonte grise peut être le siège d'une dissolution sélective du fer qui laisse en place une structure poreuse de graphite, d'où le nom graphitisation. Cette forme d'attaque est favorisée par les sulfates. Pour y remédier, on ajoute du nickel à la fonte (Dabosi *et al.*, 1994). Dans ce type d'attaque, la conduite paraît rouillée, mais sa forme reste inchangée, ce qui peut entraîner des situations dangereuses.

2.2.1.5 La corrosion bactérienne

Comme son nom l'indique, certaines bactéries peuvent corroder les conduites métalliques. Ces bactéries sont surtout les bactéries anaérobies réductrices de sulfates. Ces dernières se développent sous les dépôts, sous les produits de corrosion et dans des sites de la conduite qui sont faiblement aérés. Ce point sera détaillé à la section 2.2.2.4. La Figure 3 montre quelques formes de corrosion les plus répandues sur les conduites métalliques.

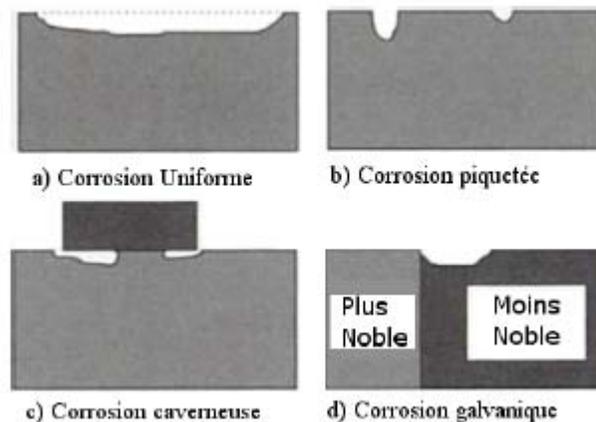


Figure 3. Quelques formes de corrosion les plus répandues sur les conduites métalliques (adapté de Roberge, 1999).

2.2.2 Effet des caractéristiques du sol sur la détérioration des conduites

Les caractéristiques du sol ont une influence non négligeable sur la détérioration des réseaux d'aqueduc. Les composantes biologiques et chimiques ainsi que l'aération du sol définissent son taux d'agressivité. Le sol contient, parmi une multitude d'éléments chimiques et de composés, une quantité élevée de sels. Ceux-ci peuvent avoir un effet défavorable en augmentant le taux de corrosion des conduites en fonte grise par la création de cellules galvaniques. Quelques recherches ont montré que la texture du sol joue aussi un rôle dans la formation de piles de corrosion sur les conduites (ex. : Doyle *et al.*, 2003). La texture du sol est déterminée par les proportions de sable, de silt et d'argile qui le constituent. À part la texture du sol, les facteurs qui sont le plus souvent pris en compte pour déterminer le taux d'agressivité du sol sont cités ci-dessous et décrits aux sections suivantes :

1. la résistivité du sol;
2. la concentration en ions d'hydrogène (pH);
3. le potentiel d'oxydoréduction (Rédox);
4. la présence de sulfates (qualitatif);
5. le taux d'humidité (relatif);
6. la description du sol (homogénéité, taille des particules, couleur, texture, etc.);
7. dans certains cas, la présence de courants vagabonds (équipement industriel, transport utilisant des trames électriques, etc.).

2.2.2.1 La résistivité du sol

La résistivité est la propriété d'un matériel conducteur de résister aux courants électriques. C'est un indicateur de la capacité d'un environnement (ex. : sol) à véhiculer des courants corrosifs. Les résistivités des sols peuvent s'étendre entre moins de 1 000 ohm-cm dans des sols très humides à plus de 100 000 ohm-cm dans des sols secs comme le sable et le gravier (NRCNA, 2009).

Plus la résistivité du sol est faible, plus le sol est jugé agressif (corrosif). Ceci est dû au fait qu'une résistivité faible permet un déplacement facile des charges, donc un flux de courant plus

élevé entre les sites de potentiels différents. Le Tableau 2 illustre un exemple de répartition des résistivités selon leur effet sur la corrosivité du sol.

Tableau 2. Classification de la corrosivité des sols selon la résistivité (tiré de O'Day, 1989).

Résistivité du sol (ohm-cm)	Corrosivité
0 – 2 000	Très corrosif
2 000 – 5 000	Corrosif
5 000 - 10 000	Modérément corrosif
10 000 – 25 000	Moyennement corrosif
25 000 – 50 000	Relativement corrosif
50 000 – 100 000	Progressivement non corrosif

2.2.2.2 Le pH du sol

La plupart des sols possèdent un pH de 4 à 8 et, dans cet intervalle, ils sont considérés comme moins corrosifs. Quand le pH est inférieur à 4 ou supérieur à 8,5, le sol devient plus corrosif. Cependant, un pH neutre est favorable à la présence de bactéries réductrices de sulfates (BRS), qui contribuent à la formation de la corrosion microbiologique (NRCNA, 2009).

2.2.2.3 Le potentiel redox

Le potentiel redox est lié au degré d'aération du sol. Des niveaux très faibles ou négatifs de potentiel redox indiquent que le sol est anaérobie et, par conséquent, qu'il peut favoriser la présence de bactéries réductrices de sulfates.

2.2.2.4 Sulfates ou présence de bactéries sulfato-réductrices

Dans certains cas, la corrosion est provoquée par l'attaque de certaines bactéries dites anaérobies qui, pour vivre, digèrent certains éléments pour en rejeter d'autres. Ces bactéries vivent dans des sols humides avec peu ou pas d'oxygène et qui contiennent des ions de sulfates, des composants organiques et des minéraux. Elles peuvent ainsi détruire certains revêtements protecteurs des conduites. Un exemple de ces bactéries est la *gallionella ferruginea*, bactérie anaérobie et photosynthétique qui provoque la formation de tubercules d'hydroxyde dans les conduites d'eau potable, entraînant des piqûres locales de

corrosion. Les conditions qui favorisent la croissance de ces bactéries sont un pH neutre ou légèrement acide, un pourcentage élevé de CO₂ (Sogaard *et al.*, 2001) et des températures de 2 °C à 60 °C. Les BRS emploient les sulfates comme accepteurs d'électrons pour la dégradation des composés organiques. Elles provoquent des émanations d'acide sulfurique (H₂S) qui diffusent à travers un biofilm. Pendant la corrosion électrochimique, un film d'hydrogène se forme sur la cathode, provoquant une polarisation. Ce film diminue le flux du courant et, par conséquent, la dureté des cellules corrosives. Les bactéries réductrices de sulfates dépolarisent la cathode, réduisent le sulfate en sulfures et éliminent le film d'hydrogène. Cela augmente le taux de corrosion et forme le produit de corrosion FeS, en plus de l'hydroxyde de fer (Fe(OH)₂). Les sols argileux favorisent la croissance des bactéries sulfato-réductrices à cause de la présence de conditions anaérobies nécessaires pour leur croissance (Doyle *et al.*, 2003).

2.2.2.5 Présence d'humidité dans le sol

La corrosivité du sol dépend fortement de la quantité d'eau qu'il maintient. Les changements du taux d'humidité dans le temps peuvent également influencer la corrosion. Par exemple, un sol composé majoritairement de sable dans un secteur aride peut ne pas être très corrosif. Cependant, un sol qui contient des chlorures et qui est soumis à une humidité peu fréquente (provenant de la pluie) peut être fortement agressif. Pendant la période de séchage, les chlorures peuvent devenir concentrés sur la surface, rendant les conditions locales bien plus agressives. Si un point de corrosion s'initie dans la conduite, ce processus humidité/sécheresse peut induire une corrosion très intense, augmentant ainsi d'une manière considérable sa profondeur (NRCNA, 2009)

2.2.3 Le TAS, un indice pour caractériser l'agressivité du sol

Le TAS (taux d'agressivité du sol) est un système de pointage développé par l'*American Water Works Association* et l'*American National Standards Institute* pour évaluer le taux d'agressivité des sols (norme ANSI/AWWA C105/A21.5-99). Le système de pointage consiste à assigner des points à chacune des propriétés du sol (voir Tableau 3). Le TAS résume l'influence que peut avoir chacune des caractéristiques du sol sur les conduites. Si la valeur totale du TAS est supérieure à 10, le sol est considéré comme corrosif pour les conduites en fonte. L'application d'une protection cathodique est alors suggérée.

Tableau 3. Grille d'évaluation du taux d'agressivité du sol selon le standard ANSI/AWWA C-105/A21.5-99 (adapté de Doyle, 2000).

Résistivité (ohm-cm)	Points
< 700	10
700 - 1 000	8
1 000 – 1 200	5
1 200 - 1 500	2
1 500 - 2 000	1
> 2 000	0
pH	Points
0 - 2	5
2 - 4	3
4 – 6,5	0
6,5 - 7,5	0*
7,5 – 8,5	0
> 8,5	3
Sulfures	Points
Positifs	3,5
Trace	2
Négatifs	0
Humidité	Points
Drainage pauvre; continuellement humide	2
Drainage moyen; généralement humide	1
Drainage excellent; généralement sec	0
Potentiel redox (mV)	Points
> 100	0
50 à 100	3,5
0 à 50	4
< 0	5

* Si les sulfures sont présents dans le sol et le potentiel redox est < 100 mV ou négatif, ajouter 3 points.

2.3 Modélisation mathématique de la profondeur de corrosion

2.3.1 Modèles généraux

La modélisation mathématique de la profondeur de corrosion sur des objets métalliques est souvent basée sur l'observation du phénomène en laboratoire. Même dans des conditions de laboratoire contrôlées, c.-à-d. où on connaît exactement : i) la composition des échantillons métalliques; ii) la composition des liquides dans lesquels sont immergés ces échantillons; et iii) le temps d'immersion, on constate une très grande variabilité du nombre de points de corrosion et de la profondeur maximale de corrosion sur chacun des échantillons observés. Ainsi, on considère que le processus de corrosion possède un caractère aléatoire (Provan et Rodriguez III, 1989) et c'est pourquoi plusieurs auteurs ont recours à des modèles probabilistes pour estimer les profondeurs de corrosion. À titre d'exemples, l'approche probabiliste a été utilisée pour modéliser la profondeur de corrosion sur des échantillons de métal immergés dans un liquide corrosif (Provan et Rodriguez III, 1989; Vajo *et al.*, 2003) ainsi que sur des poutres et des dalles de béton armé (Darmawan et Stewart, 2007; Stewart et Al-Harthy, 2008).

2.3.2 Modèles appliqués aux conduites enfouies

Peu d'études sont consacrées au développement de modèles de prédiction de la corrosion pour les conduites d'eau potable, mais un plus grand nombre s'intéresse à la corrosion sur les conduites de gaz enfouies. Bien que le phénomène de corrosion soit sensiblement le même pour ces deux types de conduites, la différence de matériau, et surtout la fréquence d'observation sur les conduites de gaz, empêchent l'utilisation directe sur les conduites d'eau potable de modèles développés pour les conduites de gaz.

Dans les deux cas cependant, on retrouve deux types d'approche pour modéliser l'épaisseur résiduelle des conduites, soit les approches empiriques et stochastiques. L'approche empirique se base sur l'observation du processus de corrosion et sur la mise en place de relations mathématiques entre la profondeur de corrosion et divers facteurs explicatifs; certains de ces modèles font des liens avec la cinétique et la thermodynamique de la réaction du métal avec le milieu environnant. L'approche stochastique consiste à observer le phénomène et à le décrire à l'aide de lois statistiques. En fonction des données disponibles, autant les modèles empiriques

que stochastiques permettent de prendre en considération les facteurs environnementaux (ex. : propriétés physiques et chimiques du sol environnant et de l'eau transportée, etc.) et les caractéristiques des conduites (ex. : âge, diamètre, etc.) pour la prédiction de la corrosion. Les modèles empiriques sont basés sur des relations statistiques et donnent comme réponse, pour une conduite donnée à un moment donné, une valeur prédite de profondeur de corrosion. Quant aux modèles stochastiques, ils fournissent plutôt une probabilité de se situer dans un certain intervalle de profondeurs de corrosion. Les principales applications de ces deux types de modèles pour prédire la profondeur de corrosion sur des conduites enfouies sont présentées aux sections suivantes.

2.3.2.1 Modèles empiriques

Un des modèles empiriques les plus cités pour la prédiction de la corrosion sur des objets de métal enfouis est le modèle de Rossum (1969). L'équation du modèle de Rossum, pour le suivi de l'évolution de la profondeur maximale de corrosion sur un objet enfoui, a la forme suivante :

$$p = K_n K_a \left(\frac{(10 - pH) \cdot t}{\rho} \right)^n A^a \quad (1)$$

où : p = profondeur de la pique en mils²; K_n et a = constantes qui dépendent du type de métal; K_a = paramètre qui dépend du potentiel redox du sol; n = indice d'aération compris entre 0 et 1; ρ = résistivité du sol; t = temps d'exposition à la corrosion; et A = surface de la conduite exposée à la corrosion. Selon le modèle de Rossum, le taux annuel de corrosion est maximal durant les premières années et décroît durant les années subséquentes. Pour établir ce modèle, Rossum a exploité la base de données du *National Bureau of Standards* (NBS) à la fin des années 1960. Le NBS avait enfoui, depuis 1922, 36 500 échantillons de métal représentant 333 types de métal dans 47 sols différents. Tel que mentionné par Rossum (1969) lui-même, les infrastructures enfouies sont toujours de plus grande taille que les échantillons analysés pour développer cette équation, en plus d'être parfois connectées électriquement avec des métaux différents; il faut donc modifier l'équation de Rossum de façon appropriée avant de pouvoir l'appliquer pour prédire la profondeur de corrosion maximale sur une infrastructure réelle.

² Le mil est une unité de longueur égale à 10^{-3} pouce, soit 0,254 mm.

Rajani *et al.* (2000) ont tenté d'appliquer le modèle de Rossum (1969) sur un ensemble de 71 conduites excavées provenant de différentes municipalités d'Amérique du Nord, et pour lesquelles ils disposaient d'un échantillon de sol prélevé tout juste à côté de chacune des conduites. Cependant, ils ont constaté que la profondeur de piqûre maximale en fonction de $((10 - pH) \cdot t / \rho)$ (voir équation 1 ci-haut, pour la définition des variables) affichait des points très dispersés, ce qui indique que le modèle de Rossum (1969) ne pouvait pas être appliqué sur l'ensemble des conduites de l'échantillon. Rajani *et al.* (2000) ont donc proposé leur propre modèle, soit :

$$p_c = a t + b(1 - e^{-ct}) \quad (2)$$

où : p_c = profondeur moyenne de corrosion; t = temps d'exposition de la conduite à la corrosion (âge); a , b et c = paramètres dont la valeur doit être déterminée à partir des données disponibles, selon les techniques d'ajustement conventionnelles.

Suite à la mesure de la corrosion externe sur 55 conduites excavées en Ontario, pour lesquelles un échantillon de sol à proximité était disponible, Doyle *et al.* (2003) ont établi une relation pour estimer la profondeur de corrosion externe en fonction du pH et de la résistivité :

$$y = 0.6874 - 0.037x_1 - 0.0887x_2 \quad (3)$$

où : y = taux maximum de corrosion externe (mm/an); x_1 = pH et x_2 = logarithme de la résistivité ($\log(\text{ohm-cm})$). Cette relation linéaire affiche un coefficient de détermination (r^2) de 0,41 seulement, ce qui indique que le pouvoir prédictif du modèle est relativement faible.

Pour le développement d'un modèle de prédiction de la profondeur de corrosion, Velazquez *et al.* (2009) disposaient d'un échantillon de 250 conduites de gaz excavées (au Mexique) et d'autant d'échantillons de sol prélevés à proximité. À partir de ces observations, ils ont développé un modèle de la forme :

$$d_{\max} = \kappa(t - t_0)^v \quad (4)$$

où d_{\max} = profondeur maximale de corrosion; t = temps; t_0 = temps d'initiation de la corrosion (paramètre du modèle dont la valeur doit être déterminée lors du calage); κ = fonction (linéaire) du potentiel redox du sol, du pH du sol, du contenu en chlorures du sol, du contenu en bicarbonate du sol et du contenu en sulfure; et v = fonction (linéaire) du potentiel sol-conduite, de la teneur en eau du sol, de la densité apparente du sol et du type de revêtement. Pour établir cette relation, Velazquez *et al.* (2009) avaient préalablement identifié des corrélations

significatives entre la profondeur maximale de corrosion (d_{max}) et les variables explicatives intégrées au modèle.

2.3.2.2 Modèles stochastiques

Étant donné le caractère aléatoire du processus de corrosion, les modèles mathématiques les plus appropriés pour décrire la progression de la profondeur de corrosion demeurent les modèles stochastiques. Dès 1954, Gumbel (cité dans Shibata, 1996) suggérait que les statistiques de valeurs extrêmes pourraient être appliquées pour prédire la profondeur maximale de corrosion pour des objets enfouis dans le sol. En 1956, Aziz démontrait que la théorie des valeurs extrêmes pouvait être appliquée pour analyser les piqûres de corrosion maximales d'alliages d'aluminium. Selon Shibata (1996), l'estimation des profondeurs localisées de corrosion demeure difficile, sauf si l'approche probabiliste est utilisée. Les statistiques de valeurs extrêmes seraient, toujours selon Shibata (1996), une méthode performante pour analyser des données distribuées de façon aléatoire, comme on en rencontre en corrosion localisée, et pour estimer la profondeur maximale de corrosion. Cette approche consiste à retenir, pour un échantillon d'éléments observés (des conduites par exemple), la valeur maximale de profondeur de corrosion sur chacun de ces éléments, puis de représenter la distribution des ces valeurs maximales à l'aide d'une loi statistique. Une fois cette fonction statistique établie sur la base des données observées, elle peut être appliquée pour estimer la probabilité que la perte de corrosion maximale sur une conduite donnée se situe dans un intervalle donné.

Plusieurs auteurs ont montré que les profondeurs maximales de corrosion suivaient des distributions statistiques de valeurs extrêmes (ex. : Sheikh *et al.*, 1990; Velazquez *et al.*, 2009). Caleyó *et al.* (2009) ont utilisé ce type de modélisation pour représenter la profondeur maximale de corrosion sur les conduites de gaz analysées par Velazquez *et al.* (2009) (voir section 2.3.2.1), tandis que Valor *et al.* (2007) l'ont appliqué pour reproduire des observations de corrosion sur des pièces de métal immergées et que Sheikh *et al.* (1990) l'ont appliqué à des conduites d'injection d'eau dans un champ pétrolifère. À notre connaissance, les modèles statistiques de valeurs extrêmes n'ont pas encore été appliqués pour estimer les profondeurs de corrosion sur les conduites de distribution d'eau potable.

2.3.3 Conclusion

Les modèles empiriques d'estimation de la profondeur de corrosion requièrent une grande quantité de données pour leur développement; leurs résultats ne s'avèrent pas toujours

concluants et sont peu reproductibles. En revanche, la corrosion est souvent considérée comme étant de nature aléatoire (Alamila et Sosa, 2008), à cause notamment du manque de connaissance concernant les divers facteurs qui interviennent dans le processus de corrosion et de leur variation dans le temps. Ce caractère aléatoire est observable même dans des conditions contrôlées en laboratoire. Or, à l'opposé de ce qui se passe en laboratoire, une infrastructure est exposée à des conditions agressives pendant de nombreuses années et les facteurs qui contrôlent le processus de corrosion changent continuellement dans le temps (Alamila et Sosa, 2008). Ces conditions rendent l'utilisation de modèles probabilistes plus appropriée pour décrire et prédire la progression de la corrosion des conduites souterraines de distribution d'eau potable. C'est donc ce type de modèle que nous développerons dans ce qui suit pour les conduites d'aqueduc de la ville de Québec.

3. Outils et données

3.1 Données disponibles en début de projet

3.1.1 Réseau d'aqueduc de la Ville de Québec

Le réseau d'aqueduc de la Ville de Québec est composé de 2 550 km de conduites, dont 59 % sont de matériau inconnu. Parmi les conduites dont le matériau est connu, 72 % sont en fonte (pour un total de 762 km). Les dates d'installation des conduites d'aqueduc ne sont fournies, dans la base de données fournie par la Ville, que pour 31 % des conduites. Pour les autres conduites, les années d'installation ont été estimées, par le personnel de la Ville de Québec, à partir de la date de construction de la chaussée. Or, cette date est souvent estimée, à son tour, à partir de la date de construction du plus vieux bâtiment de la rue. En combinant les dates estimées de cette façon avec les dates d'installation réelles, on arrive à attribuer une date d'installation à 82 % des conduites du réseau. Cette façon de faire peut cependant conduire à des situations farfelues, tel par exemple des conduites d'aqueduc dont l'année de construction estimée est 1604... En l'absence d'autre information, ce sont tout de même ces dates d'installation qui ont été retenues pour toutes les analyses présentées dans ce rapport. Il faudra donc considérer, lors de l'analyse des résultats, que la date d'installation des conduites est entachée d'une certaine incertitude, et que cette incertitude est d'autant plus grande pour les conduites les plus vieilles. La figure suivante (Figure 4) donne un aperçu d'ensemble des données disponibles dans la base de données fournie par la Ville de Québec en début de projet.

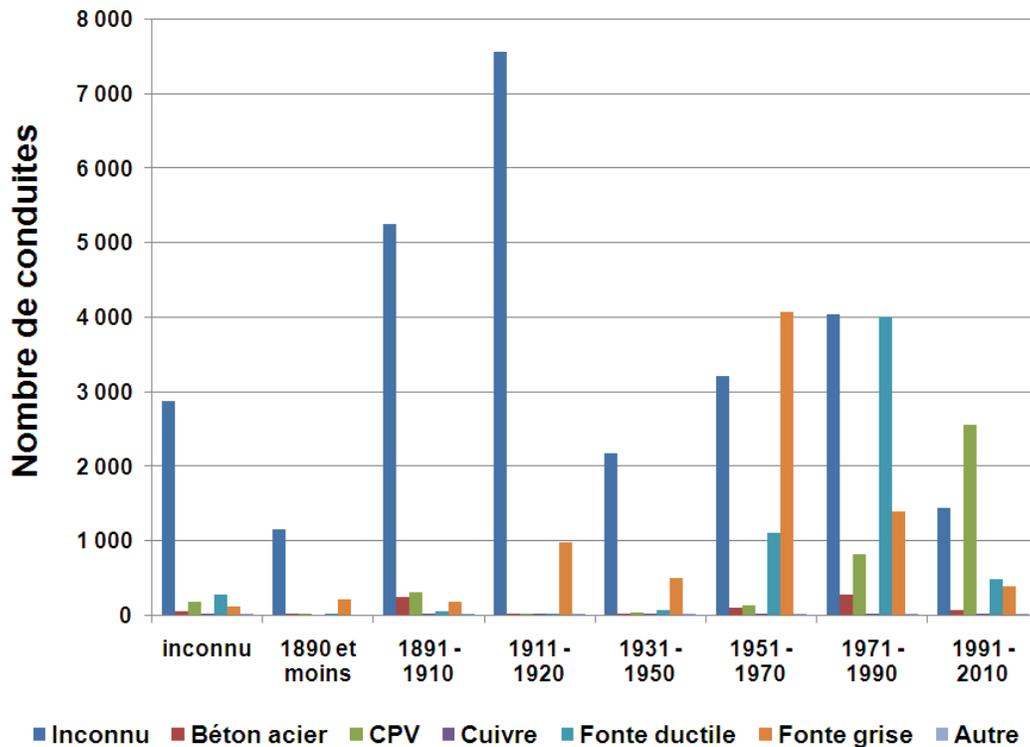


Figure 4. Distribution des conduites par classes d'âge et de matériau, selon les données fournies par la Ville de Québec.

3.1.2 Caractéristiques du sol

Tout au long du projet, la Ville de Québec nous a transmis les résultats d'analyses de sol dont elle disposait sur son territoire. Certains des résultats d'analyses ont été transmis sous forme de bases de données Excel ou ArcGIS, tandis que d'autres nous ont été fournis sous forme de rapports numérisés (fichiers pdf) et ont dû être ajoutés manuellement aux bases de données. Au total, des analyses de sol ont été réalisées en 615 points, dont la localisation est illustrée à la Figure 5. Nous avons pu recueillir les informations concernant le TAS et la teneur en eau pour chacun de ces 615 points. Toutefois, la résistivité, le potentiel redox et le pH ne sont connus que pour environ 450 de ces points (bien que ces caractéristiques aient certainement été mesurées, puisqu'elles entrent dans le calcul du TAS, elles n'apparaissent pas dans les bases de données fournies par la Ville). On doit noter que les échantillons de sol analysés n'ont pas nécessairement été récoltés au voisinage de conduites d'aqueduc, et encore moins dans l'entourage des conduites dont nous connaissons la perte de paroi par corrosion. Ce point sera discuté plus en détails à la section 4.1.

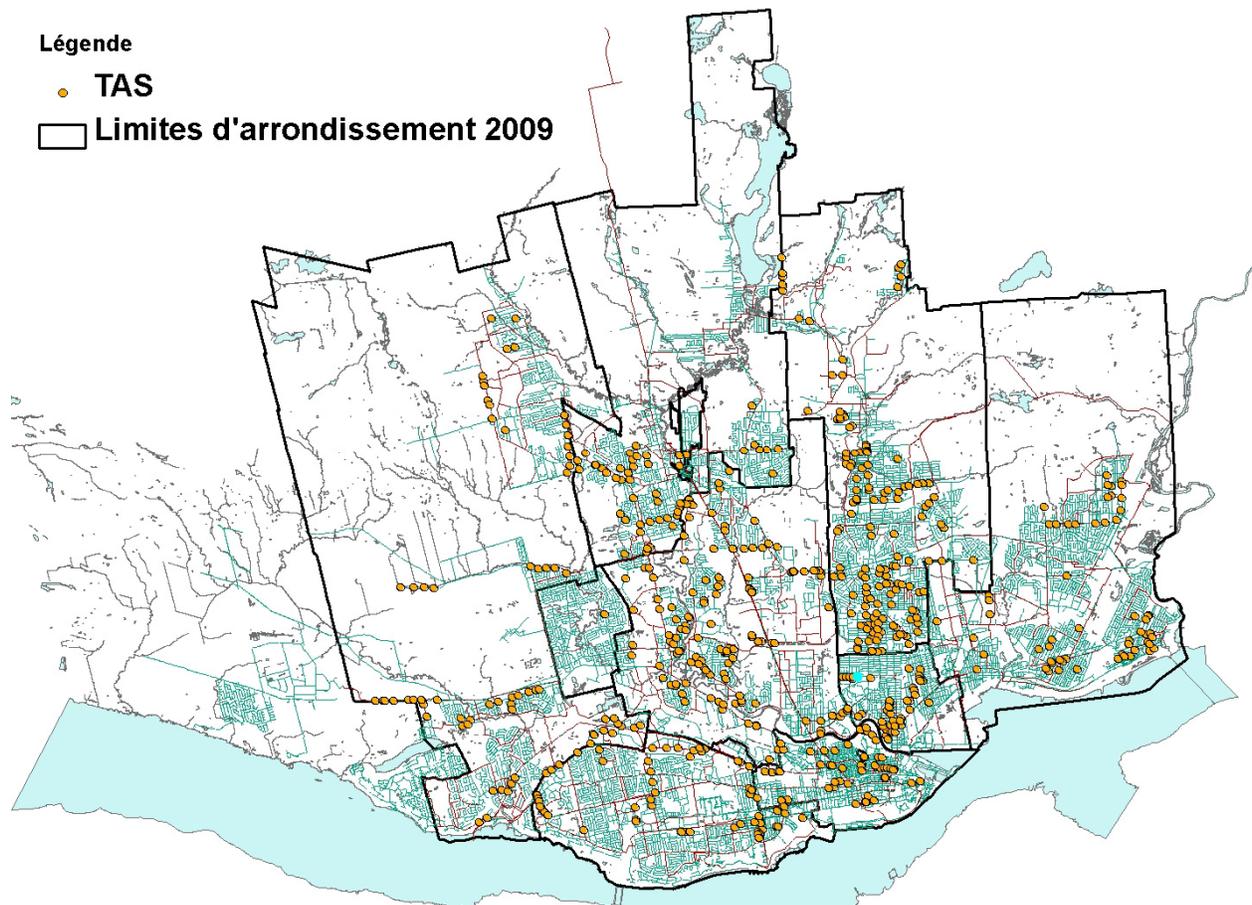


Figure 5. Localisation des échantillons de sol analysés.

3.1.3 Mesures de corrosion sur certaines conduites

Tel que mentionné en introduction nous disposons, en début de projet, de rapports d'auscultations pour 276 conduites en fonte de 150 mm de diamètre³. Ces auscultations avaient été réalisées par la compagnie Aqua Diag, de 2003 à 2006. La technique utilisée est non destructive et dite technique d'inspection par champ lointain (*remote field*). Elle permet de déterminer l'emplacement et l'étendue de la corrosion. Les rapports fournis par Aqua Diag contiennent des informations au sujet de la conduite auscultée (longueur, diamètre, année d'installation, etc.) ainsi qu'une liste des anomalies détectées (joint, défaut de corrosion, etc.) avec leur localisation. Pour chaque défaut de corrosion détecté, une estimation du pourcentage

³ Certaines conduites de 200 mm avaient aussi été auscultées, mais elles n'ont pas été prises en compte dans cette étude.

de perte de paroi et de l'étendue circonférentielle est donnée. Un extrait de rapport d'inspection est donné à la Figure 6, tandis que la Figure 7 illustre la localisation des conduites inspectées de 2003 à 2006. Plus de détails sur la technique d'auscultation sont donnés dans Bouzida *et al.* (2010) (reproduit en annexe) et Duchesne *et al.* (2011).

Rue Dandrieu :

Tronçon n° 1 (de la BF 14221 à la BF 14223) longueur : 177,2mètres

Emboîtement #	Chaînage (mètre)	Description	Perte de paroi %	Étendue circonférentielle
	0,0	Début de l'auscultation		
1	5,3	Emboîtement		
2	7,2	Emboîtement		
3	10,8	Emboîtement		
4	16,3	Emboîtement		
	19,6	Point de corrosion	11%	72°
5	21,8	Emboîtement		
	25,5	Point de corrosion	12%	163°

Figure 6. Exemple de résultat d'inspection.

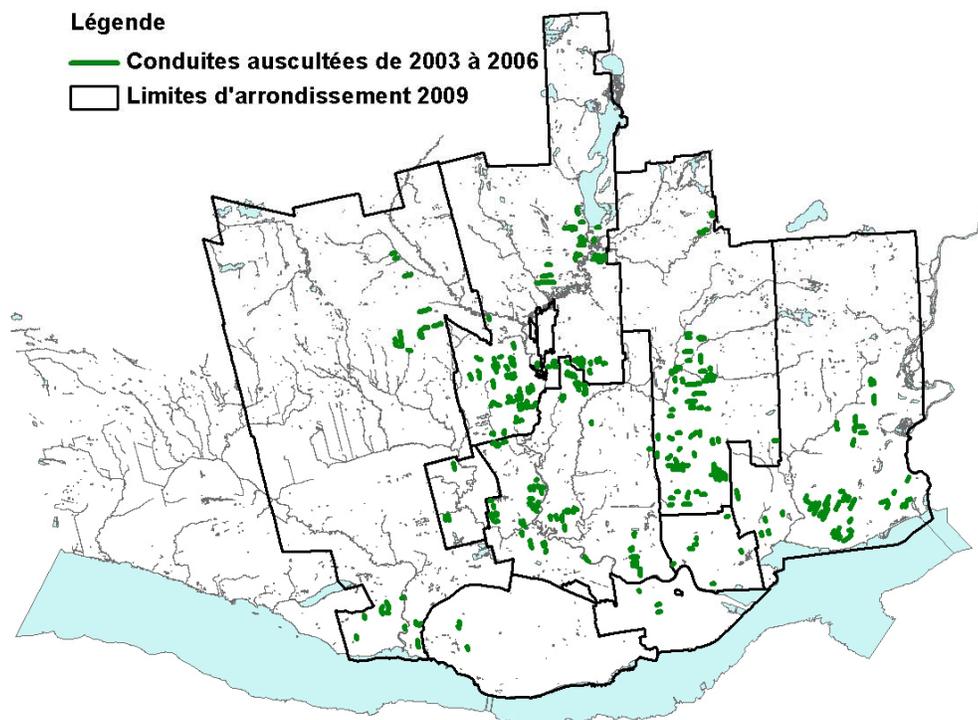


Figure 7. Localisation des conduites auscultées de 2003 à 2006.

Les 276 rapports d'inspection nous ont été transmis en début de projet sous fichiers Word et pdf. Une base de données (fichiers Access et .shp) a été créée à partir de ces rapports. Cette base de données contient les informations suivantes :

- ✓ code administratif (code attribué à chaque inspection);
- ✓ recommandation issue de l'inspection;
- ✓ nombre de défauts de corrosion détectés;
- ✓ perte de paroi minimale (en %);
- ✓ perte de paroi maximale (en %);
- ✓ localisation (nom de la rue, de, à);
- ✓ année d'auscultation;
- ✓ longueur auscultée (m);
- ✓ bornes d'incendie par lesquelles la sonde a été introduite et retirée.

3.2 Validation de la technique Aqua Diag

Les pertes de corrosion maximales détectées sur chaque conduite auscultée ont servi à l'élaboration du modèle de corrosion (voir Chapitre 4). Cependant, afin de s'assurer que les résultats fournis par Aqua Diag représentent bel et bien l'état de la conduite auscultée, des travaux de validation de la technique ont été réalisés en laboratoire à l'automne 2009. Ces travaux sont détaillés dans un rapport distinct (Bouzida *et al.*, 2010), fourni en annexe. Mentionnons seulement ici que ces travaux ont consisté à analyser par tomodensimétrie (*CT scan*) six tuyaux de fonte excavés (fournis par la Ville de Québec) et à comparer les résultats de ces analyses, en matière de localisation, d'étendue et d'ampleur des pertes de paroi, avec les rapports d'auscultation fournis par Aqua Diag pour ces six mêmes tuyaux. La conclusion générale de cette étude est que la sonde Aqua Diag est un outil approprié et utile pour l'inspection des conduites d'eau en fonte, car elle fournit des informations fiables sur les principaux défauts de corrosion, et donc sur l'état général de la structure des tuyaux inspectés. Ces travaux de validation ont été nécessaires avant d'utiliser les résultats des auscultations Aqua Diag comme information de base pour la construction du modèle de corrosion et ont constitué une part importante des travaux réalisés dans ce projet.

3.3 Campagnes d'échantillonnage

Afin d'accroître le nombre de données pour le développement du modèle de corrosion, des auscultations supplémentaires ont été réalisées en 2009 et 2010 dans le cadre de ce projet. Les sections suivantes décrivent tout d'abord comment les conduites auscultées ont été choisies et présentent ensuite les principaux résultats de ces auscultations.

3.3.1 Planification des campagnes

Le nombre de conduites auscultées dans le cadre de ce projet a été déterminé en fonction du budget disponible pour cette activité. L'identification des conduites à ausculter a été réalisée en fonction des critères suivants :

- conduite en fonte grise ou ductile;
- diamètre de 150 mm;
- facilité d'accès aux bornes-incendie;
- pas de borne-incendie de type Drolet 100 ni Ludlow;
- présence de vannes à proximité des bornes-incendie afin de couper l'eau seulement sur le secteur à ausculter;
- longueur de tronçons supérieure à 15 m et inférieure à 225 m;
- données sur les caractéristiques du sol connues;
- pas plus de deux coudes sur la longueur à ausculter;
- tronçon représentatif de l'ensemble du territoire;
- intérêt particulier de la Ville de Québec pour le plan d'intervention.

Du fait de son mode de fonctionnement, la sonde Aqua Diag ne peut ausculter que des conduites en fonte (grise ou ductile). Tel qu'illustré à la Figure 8, les conduites dont le matériau est connu et qui sont en fonte représentent environ 30 % du réseau d'aqueduc (14 286 tronçons sur 46 988). Il faut noter que le réseau de la Ville de Québec compte certainement beaucoup plus que 14 286 tronçons en fonte. Cependant, parmi tous les tronçons en fonte du réseau, l'information sur le matériau est connue pour seulement 14 286 tronçons. En effet, on peut constater, à la Figure 8, que le matériau reste inconnu pour presque 60 % des tronçons du réseau. Afin d'éviter d'introduire la sonde dans une conduite qui n'est pas en fonte, seules les conduites dont le matériau « fonte » (que ce soit grise ou ductile) est spécifié dans la base de données fournie par la Ville ont été considérées pour les auscultations.

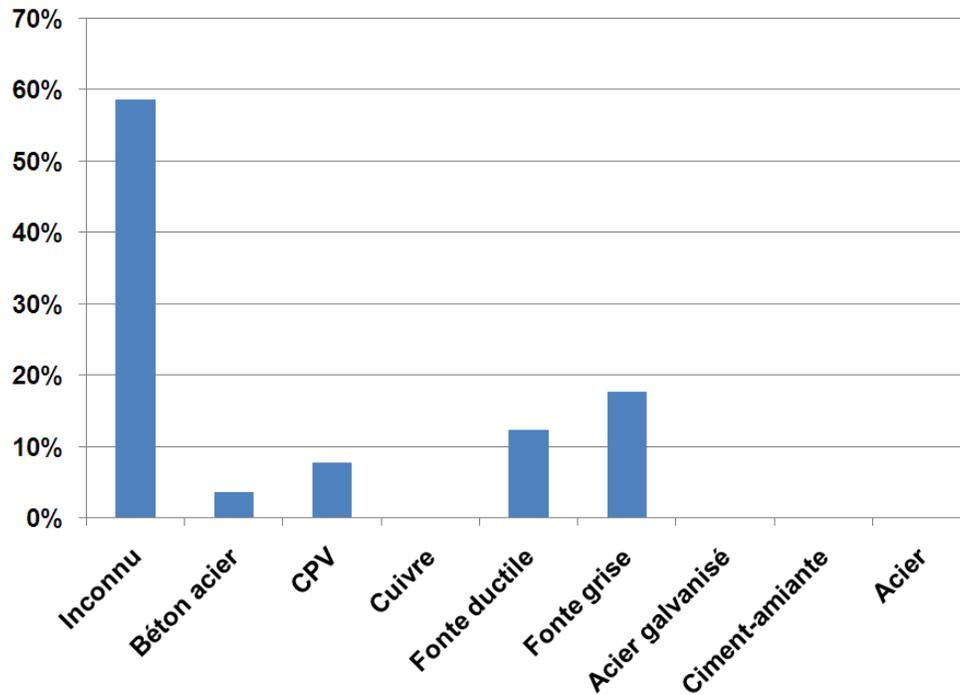


Figure 8. Répartition des matériaux selon la longueur totale des conduites.

La mise en œuvre de l'auscultation est plus facile à réaliser en utilisant les bornes-incendie pour l'introduction de la sonde. Pour les conduites de diamètres supérieurs à 150 mm, il est nécessaire de creuser des puits d'accès, ce qui entraîne des coûts supplémentaires. De plus, étant donné que le linéaire des conduites de diamètre 150 mm est le plus important comparé aux autres, le choix s'est porté sur les conduites de ce diamètre.

Il faut aussi noter que les bornes-incendie de types Drolet 100 et Ludlow sont exclues, car elles sont très difficiles à démonter, ce qui rend la réalisation d'auscultations plus compliquée. On dispose ainsi, parmi les conduites en fonte, de 7 165 conduites dont le diamètre est de 150 mm. Tous les tronçons dont la longueur est inférieure à 15 m ont été éliminés *a priori*. La longueur de conduite à ausculter est calculée d'une borne-incendie à une autre. Cette longueur ne doit pas dépasser 225 m, à cause de la dimension restreinte du câble relié à la sonde électromagnétique. Après l'élimination de tous les tronçons de longueur inférieure à 15 m et supérieure à 225 m, tous ceux qui comportent plus de deux coudes ont également été éliminés.

De plus, des conduites réparties sur l'ensemble du territoire de la ville ont été sélectionnées, afin de tenir compte de la possible disparité spatiale du taux de corrosion des conduites due aux conditions locales. Par contre, les conduites se trouvant sur la même artère que certains types

d'établissements (salons de coiffure, restaurants, hôpitaux, etc.) ont été écartées, puisque l'auscultation requiert l'arrêt temporaire de l'alimentation en eau. Aussi, pour la même raison, les conduites de 150 mm qui sont parallèles à des conduites principales de 200 mm ont été éliminées. Par la suite, les conduites près desquelles les caractéristiques du sol étaient connues (voir Figure 5) ont été privilégiées.

Enfin, un des critères importants qui a guidé le choix final des conduites à ausculter a été la volonté de la Ville de Québec d'ausculter certaines conduites, pour connaître leur état de dégradation en vue d'intégrer cette information dans le plan d'intervention. En bout de ligne, 36 conduites ont été auscultées en 2009 et 2010; le Tableau 4 résume les travaux d'auscultation réalisés.

Tableau 4. Bilan des activités d'auscultation de conduites d'aqueduc.

	Nb d'auscultations complétées	Nb d'auscultations avortées	Longueur totale auscultée
1 ^{er} sept. au 21 oct. 2009	16	10	2 302,0 m
25 mai au 29 juillet 2010	15	2	2 217,3 m
8 sept. au 16 sept. 2010	5	1	727,5 m
TOTAL	36	13	5 246,8 m

On note, au Tableau 4, que 13 auscultations n'ont pas été réussies. Pour 12 de ces conduites, l'auscultation n'a pas été possible puisque l'épaisseur des dépôts et tubercules y était telle que l'espace libre à l'intérieur de la conduite était inférieur à 100 mm de diamètre, bien que le diamètre nominal de ces conduites soit de 150 mm. Pour la treizième conduite, l'auscultation n'a pas pu être réalisée en raison d'une borne d'incendie défectueuse (impossible à démonter avec les outils et méthodes standards).

3.3.2 Analyse préliminaire des données

On dispose donc au total des résultats de 312 auscultations (276 de 2003 à 2006; 36 de 2009 à 2010), qui nous serviront à construire le modèle de corrosion. La Figure 9 donne la distribution de l'âge des conduites auscultées. On doit rappeler (voir section 3.1.1) que l'âge des conduites à l'auscultation a été estimé à partir d'une date d'installation qui est très incertaine dans certains

cas. On constate à l'examen de la Figure 9 que la majorité des conduites auscultées avait entre 20 et 50 ans lors de leur auscultation. On remarque également que certaines conduites auscultées sont très vieilles, certaines ayant jusqu'à 163 ans. Or, pour les conduites les plus vieilles, la date d'installation est souvent incertaine. En effet, il est possible qu'une rue où un bâtiment a été construit en 1860, à titre d'exemple, n'ait été desservie par un réseau d'aqueduc que dans les années 1950. Cette situation peut entraîner des incertitudes importantes dans l'âge des conduites, surtout pour les conduites les plus vieilles.

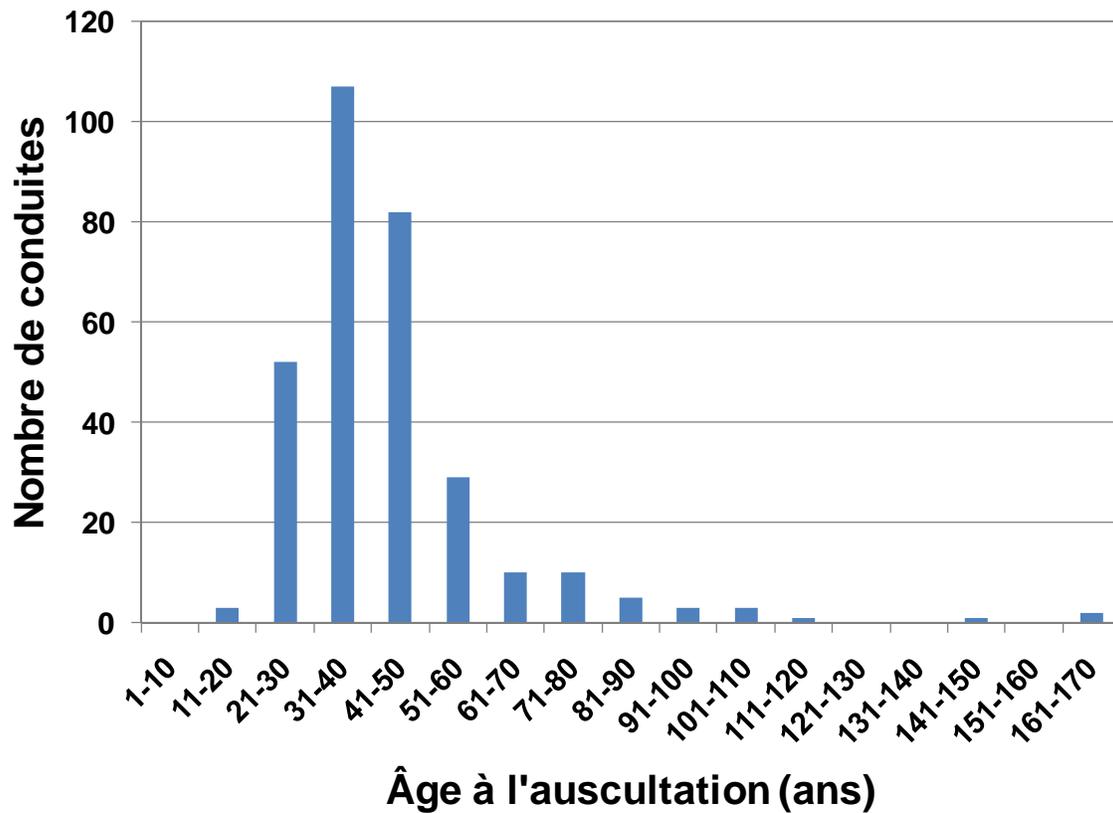


Figure 9. Distribution des conduites auscultées par groupe d'âge.

Afin d'identifier des secteurs de la ville où les conduites auraient tendance à se corroder plus rapidement, nous avons tracé, à la Figure 10, les taux de corrosion calculés pour toutes les conduites auscultées. Ce taux de corrosion a été estimé à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{taux} = \frac{p_{\max} * ep}{\text{age}} \quad (5)$$

où : $taux$ = taux de corrosion (mm/an); $pmax$ = profondeur maximale de corrosion observée sur la conduite lors de l'auscultation par Aqua Diag (%); ep = épaisseur nominale de la conduite (mm); et age = âge de la conduite lors de l'auscultation (ans). On doit mentionner que l'épaisseur nominale de la conduite n'est jamais connue et n'est pas une mesure qui peut être fournie par l'auscultation Aqua Diag. Ainsi, nous avons supposé que l'épaisseur nominale de toutes les conduites en fonte grise était de 11 mm et que celle de conduites en fonte ductile était de 6,35 mm (standards pour les conduites de 150 mm de diamètre, voir notamment NRCNA, 2009). Par ailleurs, cette estimation se base sur une connaissance *a priori* du matériau de la conduite. Pour nos estimations, nous avons considéré que l'information concernant le matériau des conduites auscultées fournie dans les rapports Aqua Diag était exacte, bien que cette technique d'auscultation ne permette pas d'estimer le matériau de la conduite auscultée. De plus, pour les conduites sur lesquelles au moins une réparation d'un bris antérieur (manchon) a été détectée par l'inspection Aqua Diag, nous avons considéré une profondeur maximale de corrosion ($pmax$) de 100 %.

La Figure 10 révèle que les taux de corrosion varient de 0 mm/an (pas de corrosion) à 0,38 mm/an (conduites en rouge) parmi toutes les conduites auscultées. Cette figure montre également qu'aucune tendance de répartition du taux de corrosion parmi les différents secteurs de la ville ne peut être détectée. Un même secteur peut contenir des conduites dont le taux de corrosion est très élevé et des conduites avec un taux de corrosion presque nul (ces conduites pouvant, dans certains cas, être très rapprochées). Par conséquent, on ne peut pas tirer de conclusions quant à la distribution du taux de corrosion des conduites en fonte dans les différents secteurs de la ville de Québec.

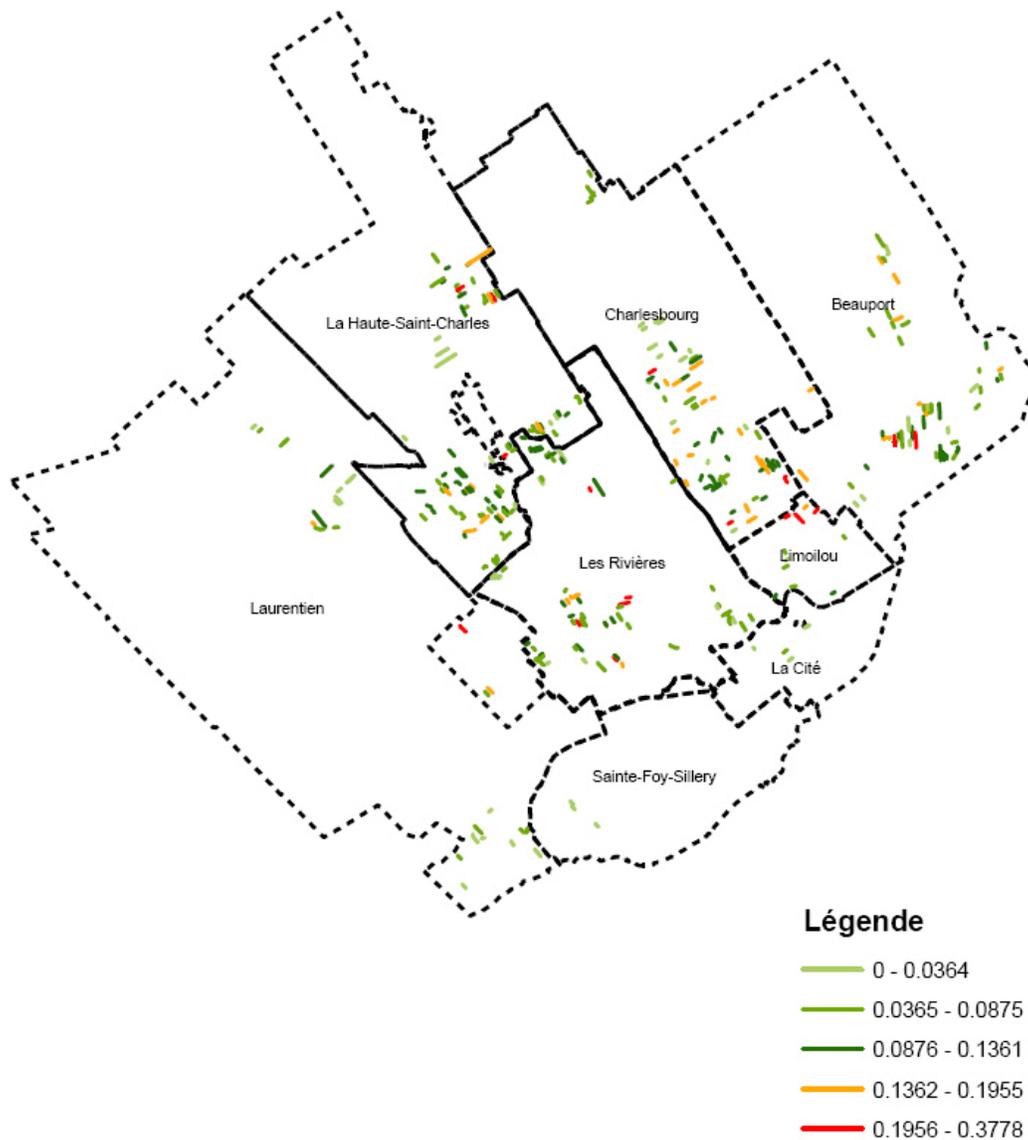


Figure 10. Carte des taux de corrosion (mm/an).

Enfin, à titre d'analyse préliminaire, la Figure 11 montre la profondeur maximale de corrosion en fonction de l'âge des conduites lors de l'auscultation. Les types de sol indiqués sur ces figures correspondent au type de sol identifié pour l'échantillon de sol situé le plus près de la conduite en question. Rappelons que pour les conduites sur lesquelles une réparation antérieure a été identifiée par la sonde Aqua Diag, on a supposé une profondeur de corrosion maximale égale à l'épaisseur de la paroi de la conduite (ce qui explique qu'on ait plusieurs points avec une perte de paroi de 11 mm).

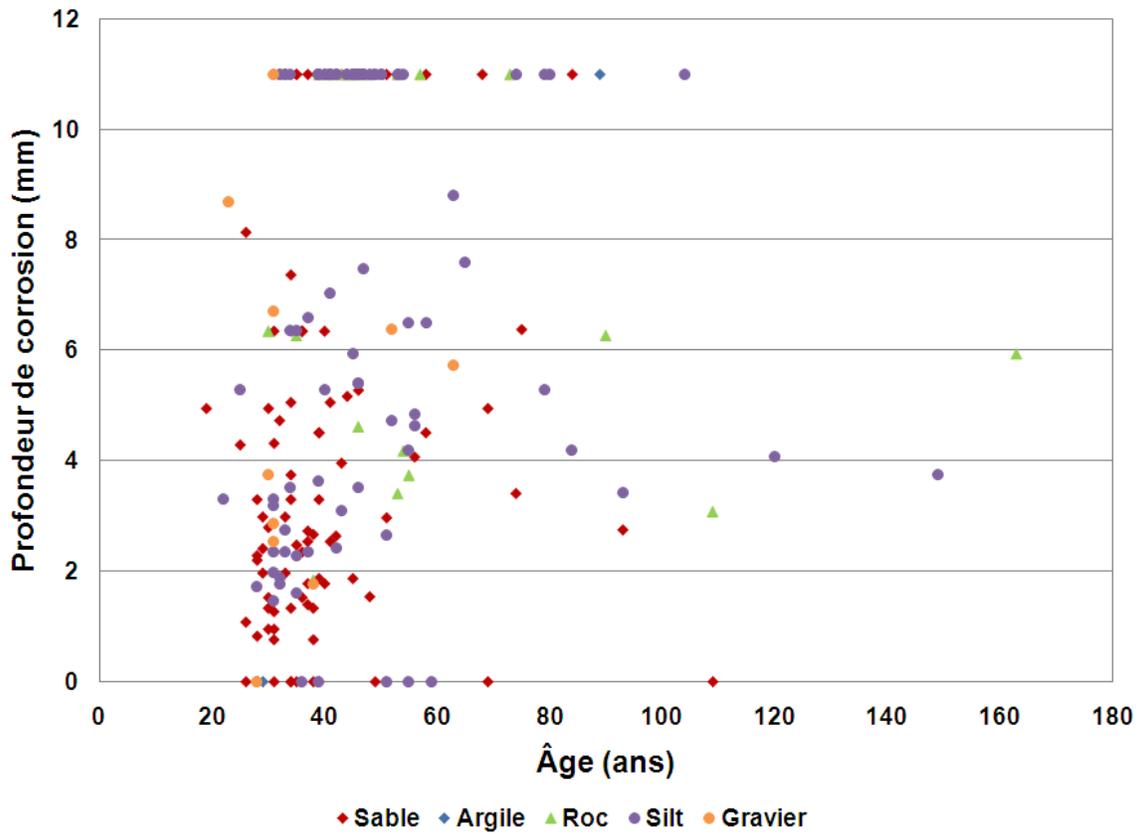


Figure 11. Profondeur maximale de corrosion en fonction de l'âge des conduites à l'auscultation.

À l'examen de la figure précédente, il ne semble pas *a priori* y avoir de relation claire entre l'âge des conduites lors de l'auscultation et la profondeur maximale de corrosion. C'est ce que nous examinerons plus en détails au chapitre suivant.

4. Développement d'un modèle mathématique de corrosion des conduites d'eau potable en fonte pour la Ville de Québec

En vue d'identifier le type de modèle le plus approprié pour décrire la corrosion des conduites en fonte à la Ville de Québec, ainsi que pour identifier les facteurs explicatifs qui devraient être pris en compte dans le modèle, nous avons tout d'abord analysé la corrélation entre la profondeur de corrosion et les caractéristiques du sol et de la conduite. Les résultats de ces analyses sont présentés à la section 4.2. Pour ce faire, il a tout d'abord fallu estimer les valeurs des caractéristiques du sol au voisinage des conduites auscultées. En effet, tel que mentionné à la section 3.1.2, les points où les caractéristiques du sol ont été analysées ne se situent pas nécessairement dans l'entourage des conduites dont la perte de paroi a été mesurée. La méthode mise en place pour estimer les caractéristiques du sol à ces endroits est décrite à la section 4.1.

Les résultats de corrélation obtenus à la section 4.2 ont permis de sélectionner les variables qui pourraient éventuellement être intégrées au modèle de corrosion. Le type de modèle retenu, les analyses réalisées avec ce modèle et les principaux résultats sont présentés aux sections 4.3 et 4.4.

4.1 Identification des caractéristiques du sol au voisinage des conduites auscultées

Les points où des analyses de sol sont disponibles, dont la localisation est illustrée à la Figure 5, correspondent rarement à la localisation des conduites auscultées. Pour chaque conduite auscultée, les caractéristiques du sol ont été estimées de la façon suivante :

1) Pour le type de sol

Le type de sol du point d'échantillonnage le plus proche a été attribué à chaque conduite auscultée, à condition que ce point soit situé à 500 m ou moins de la conduite. Les types de sol possibles sont : argile, gravier, roc, sable, sable-gravier, sable-silt, schiste, silt, silt-argile et silt-sable.

2) Pour la résistivité, le potentiel redox, le pH et le taux d'agressivité (TAS) du sol

La valeur de chacune de ces caractéristiques a été estimée pour chaque conduite auscultée par la méthode de pondération inverse à la distance, en tenant compte de tous les points de mesures situés dans un rayon de 500 m de la conduite auscultée. Cette méthode s'exprime ainsi :

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right) X_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i} \right)} \quad (6)$$

où : X_0 = la valeur estimée (résistivité, potentiel redox, pH ou TAS) au voisinage de la conduite auscultée; n = le nombre de points où le sol a été analysé, situés dans un rayon de 500 m de la conduite auscultée; d_i = la distance entre le point i où le sol a été analysé et le centroïde de la conduite auscultée; et X_i = la valeur mesurée de la caractéristique du sol (résistivité, potentiel redox, pH ou TAS) au point i .

Le Tableau 5 résume les informations qui ont pu être obtenues à l'aide des méthodes décrites ci-haut. Puisque seulement quatre conduites auscultées ont un diamètre de 200 mm (ces conduites ont été auscultées en 2005, avant le démarrage du présent projet), seules les conduites de 150 mm sont retenues pour les analyses subséquentes et sont prises en compte dans la compilation donnée au Tableau 5.

Tableau 5. Nombre de conduites de 150 mm pour lesquelles les caractéristiques du sol ont pu être estimées.

	Nombre de conduites
Auscultées	308
Auscultées avec type de sol et TAS estimés	236
Auscultées avec résistivité estimée	223
Auscultées avec potentiel redox et pH estimés	206

4.2 Corrélations entre la profondeur de corrosion et divers facteurs potentiellement explicatifs

Les facteurs explicatifs de la corrosion du sol peuvent être regroupés en deux catégories qui sont : 1) les caractéristiques du sol; et 2) les caractéristiques de la conduite.

Pour la première de ces catégories, comme première analyse, les figures suivantes illustrent les relations possibles entre le taux de corrosion des conduites en fonte et les caractéristiques du sol. Sur ces graphiques, chaque point correspond à une conduite auscultée; le taux de corrosion correspond à la perte maximale de paroi identifiée lors de l'auscultation divisé par l'âge de la conduite à l'auscultation, tandis que les valeurs des caractéristiques du sol sont celles estimées selon la méthode d'interpolation décrite à la section 4.1. À l'analyse de ces figures, il est difficile de dégager des tendances concernant l'influence des caractéristiques du sol sur le taux de corrosion. La Figure 14 montre bien que les conduites enfouies dans un sol de résistivité élevée (> 10 000 ohm-cm) ne présentent pas de taux de corrosion élevés; par contre, celles enfouies dans un sol de résistivité peu élevée peuvent présenter soit des taux de corrosion élevés ou soit des taux faibles (ou même nuls).

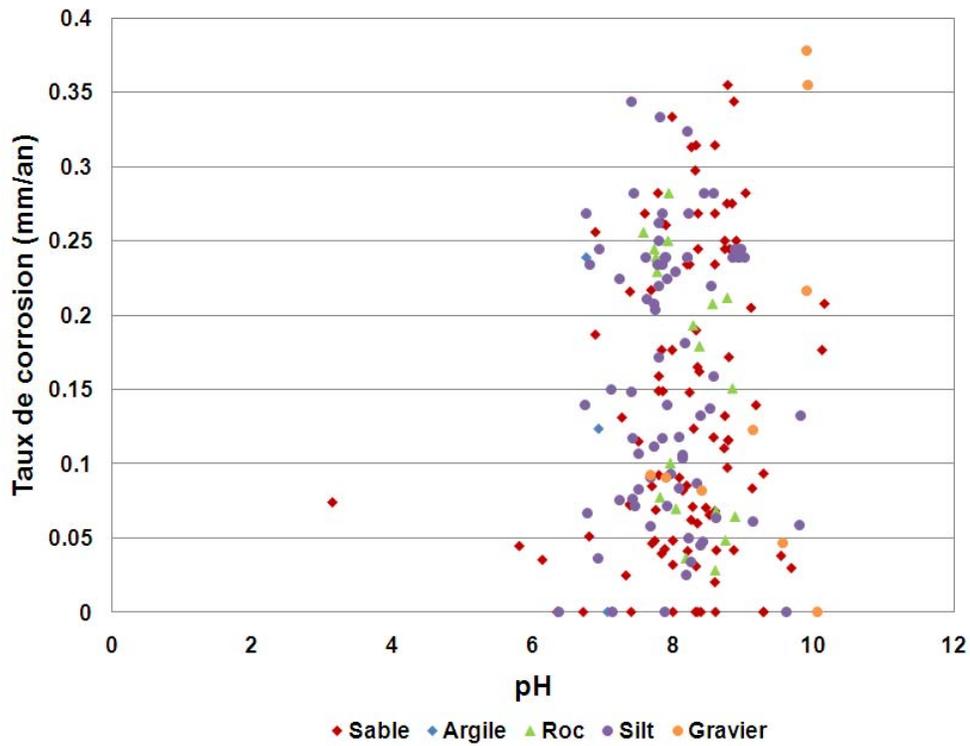


Figure 12. Taux de corrosion en fonction du pH du sol.

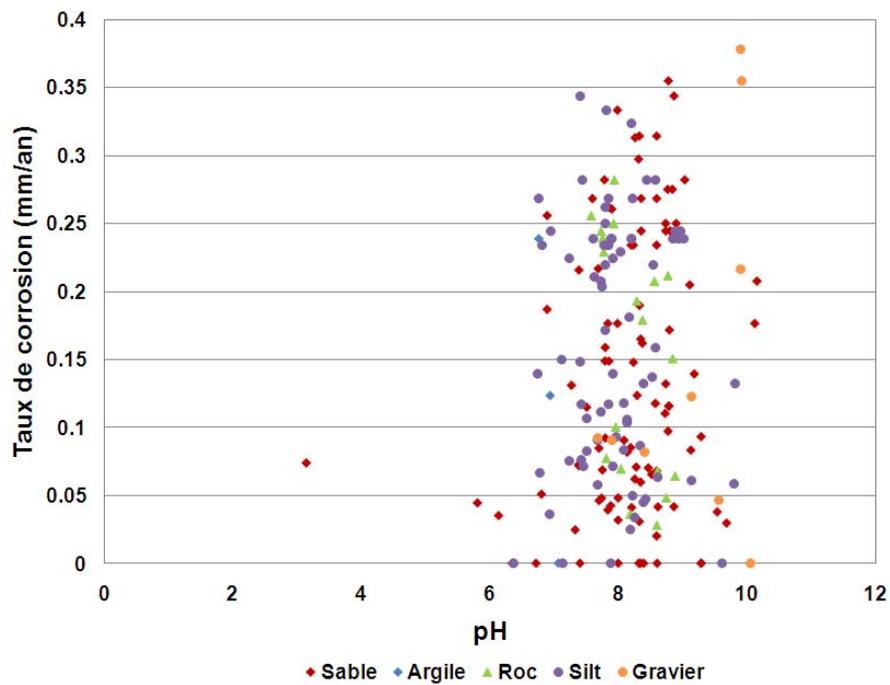


Figure 13. Taux de corrosion en fonction du potentiel redox du sol.

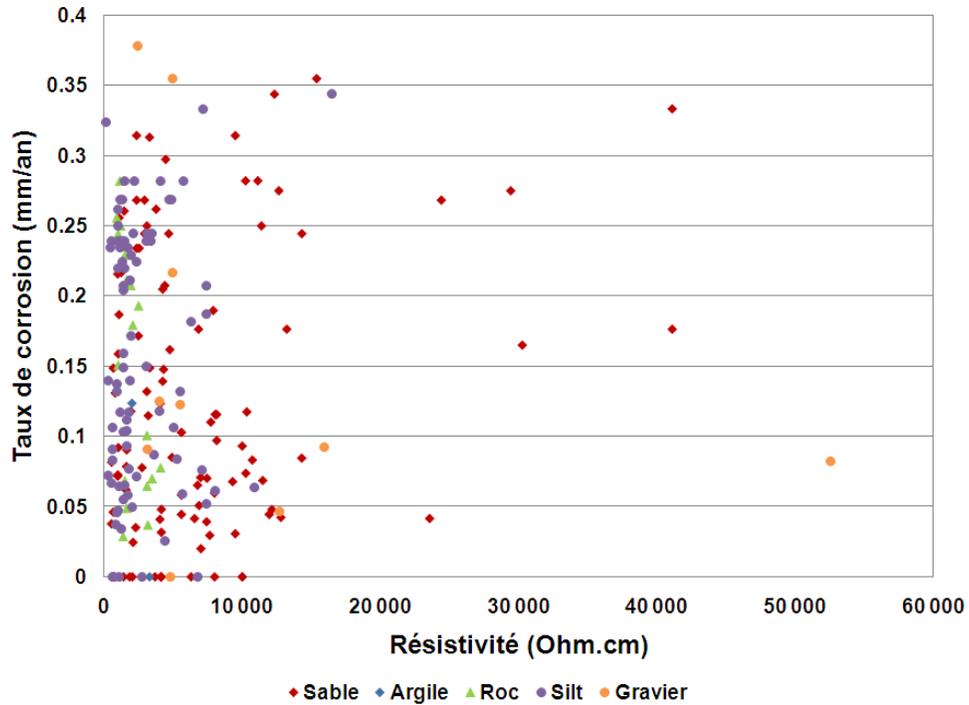


Figure 14. Taux de corrosion en fonction de la résistivité du sol.

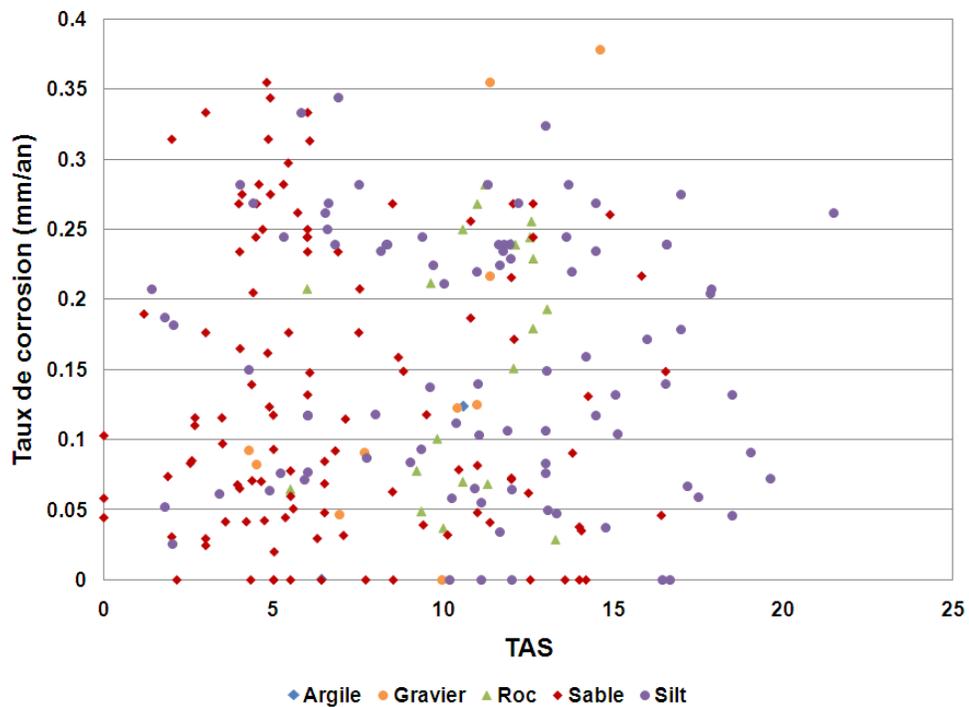


Figure 15. Taux de corrosion en fonction du taux d'agressivité du sol (TAS).

En ce qui concerne les caractéristiques des conduites, seul leur âge a pu être pris en compte. En effet, pratiquement toutes les conduites auscultées (308 sur 312) ont un diamètre de 150 mm. Les données disponibles ne permettent donc pas d'étudier le comportement des conduites en fonction du diamètre et toutes les analyses ont été réalisées sur les conduites de 150 mm. Quant au matériau, il s'agit soit de fonte ductile ou de fonte grise. On peut s'attendre à ce que ces deux matériaux aient des taux de corrosion différents. Cependant, les données disponibles n'ont pas permis de faire cette distinction puisque le matériau est rarement identifié dans la base de données. Par ailleurs, l'information sur le matériau, lorsque présente dans la base de données, n'est pas toujours fiable. Nous n'avons donc pas pu discerner les fontes grise et ductile dans nos analyses.

La profondeur maximale de corrosion en fonction de l'âge des conduites a été présentée précédemment à la Figure 11 (p. 30). Sur cette figure, le lien entre l'âge des conduites et la profondeur de corrosion n'est pas facile à observer. Pour les plus vieilles conduites cependant, tel que mentionné précédemment, l'année d'installation des conduites est très incertaine. Pour la suite des analyses, nous avons donc choisi de ne conserver que les conduites dont la date d'installation (qu'elle soit réelle ou estimée) est supérieure ou égale à 1960.

Pour ces conduites, ainsi que pour toutes les conduites auscultées, le coefficient de corrélation linéaire entre la profondeur maximale de corrosion (en %) et les facteurs potentiellement explicatifs qui ont pu être pris en compte (c.-à-d. âge de la conduite à l'auscultation, résistivité, du sol, TAS du sol, potentiel redox du sol et pH du sol) a été calculé. Le coefficient de corrélation linéaire, ou coefficient de Pearson, noté r , permet de tester s'il existe une relation linéaire entre deux variables et de tester l'intensité de cette relation. Il est calculé selon la relation suivante :

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (7)$$

où : r = coefficient de corrélation linéaire; n = nombre de valeurs dans chaque ensemble de données; x = variable dépendante (âge, résistivité, TAS, potentiel redox ou pH); et y = profondeur maximale de corrosion en pourcentage de perte de paroi.

Le résultat de ces analyses est donné au Tableau 6.

Tableau 6. Coefficient de corrélation linéaire entre la perte de paroi observée lors de l'auscultation et divers facteurs potentiellement explicatifs.

	Toutes les conduites auscultées		Conduites auscultées installées depuis 1960	
	Perte max. (mm)	Taux max. (mm / an)	Perte max. (mm)	Taux max. (mm / an)
Âge	0,17		0,41	
Résistivité	-0,06	0,05	0,03	0,08
TAS	0,10	0,02	0,06	0,05
Redox	0,08	0,11	0,17	0,13
pH	0,02	0,09	0,03	0,08

D'après les résultats présentés au tableau précédent, il semble que seul l'âge des conduites affiche une relation linéaire, quoique faible, avec la perte maximale par corrosion, et ce lorsque seules les conduites dont la date d'installation est supérieure ou égale à 1960 sont prises en compte ($r = 0,41$). Pour ces conduites, au nombre de 205, la profondeur maximale de corrosion en fonction de l'âge à l'auscultation est illustrée à la Figure 16. Sur cette figure, la relation entre la profondeur de corrosion et l'âge de la conduite est difficile à observer, surtout en raison des conduites ne présentant aucun défaut de corrosion détectable à l'auscultation (perte maximale de paroi de 0 %) et celles où au moins une réparation de bris antérieure a été détectée (perte maximale de paroi de 100 %), ces conduites pouvant être de tout âge. Ce type d'observation est dû au caractère aléatoire du processus de corrosion, tel que discuté à la section 2.3.

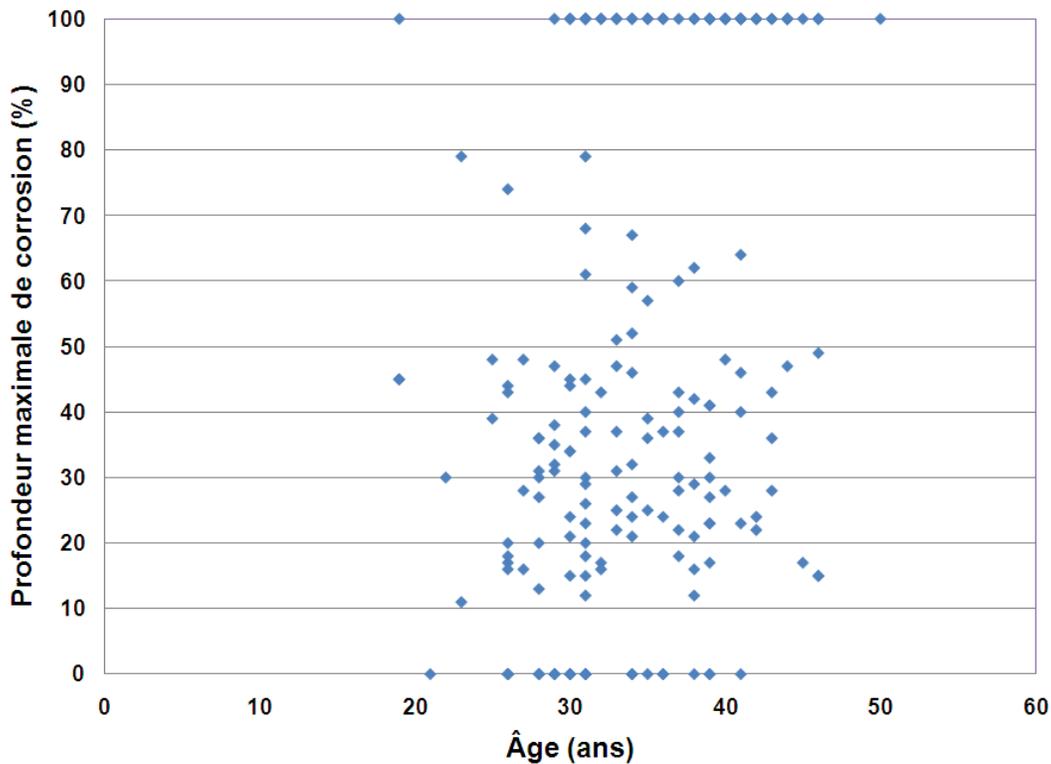


Figure 16. Profondeur de corrosion observée en fonction de l'âge de la conduite auscultée pour les conduites installées depuis 1960.

Ces résultats indiquent que seul l'âge des conduites, et non les caractéristiques du sol, pourra éventuellement être pris en compte dans le modèle de corrosion. Cette situation peut être due à la nature des données disponibles concernant les caractéristiques du sol. En effet, dans le cadre de cette étude, les caractéristiques du sol ne sont pas connues dans l'environnement immédiat des conduites auscultées et ont dû être estimées par interpolation. Cette façon de faire peut entraîner des incertitudes importantes sur les caractéristiques du sol, surtout en milieu urbain, où ces caractéristiques varient rapidement dans l'espace et où les sols composant les remblais sont presque toujours différents des sols environnants.

Il est possible que la prise d'échantillons de sol directement à côté de chaque conduite auscultée aurait permis d'identifier de meilleures corrélations entre la perte de paroi par corrosion et les caractéristiques du sol, puis d'inclure certaines de ces caractéristiques dans le modèle de corrosion. Dans certaines études (ex. : Doyle *et al.*, 2003), une relation significative entre la résistivité du sol et le taux de corrosion a été observée. Pour l'étude de Doyle *et al.* (2003) cependant, un échantillon de sol avait été récolté directement à côté des 55 conduites excavées pour lesquelles la perte de paroi a été mesurée en laboratoire. Pour ces

55 conduites, il a été possible d'établir une relation linéaire entre la perte maximale de paroi et le logarithme de la résistivité (voir section 2.3.2.1). Dans d'autres études (ex. : O'Day, 1989), aucune relation significative entre le taux de corrosion et la résistivité n'a pu être établie. Par ailleurs, dans O'Day (1989) et dans Rajani *et al.* (2000), aucune corrélation n'a été identifiée entre le taux de corrosion et le potentiel redox du sol, son pH et son TAS.

4.3 Principes généraux du modèle

Suite à la revue des modèles réalisée en début de projet, dont les principales observations sont résumées à la section 2.3, ainsi que suite à l'analyse préliminaire des données disponibles, dont les résultats sont donnés à la section précédente, il a été décidé de développer un modèle stochastique pour décrire la corrosion des conduites en fonte à la Ville de Québec. Dans ce modèle, seul l'âge des conduites pourra être retenu comme facteur explicatif de la profondeur de corrosion.

En effet, en regard des données disponibles et de la nature même du processus de corrosion, il est clair qu'un modèle donnant une valeur unique de profondeur de corrosion en fonction d'un ou de plusieurs facteurs explicatifs ne peut être mis place. Par ailleurs, des tests préliminaires, dont les résultats ne sont pas présentés dans ce rapport, ont montré que les modèles de Doyle *et al.* (2003), de Rajani *et al.* (2000) et de Rossum (1969) ne s'appliquent pas au jeu de données disponibles pour ce projet.

La mise en place d'un modèle stochastique, en revanche, est possible. Ce type de modèle donne la probabilité pour une conduite de présenter une profondeur maximale de corrosion supérieure ou égale à une valeur donnée, ou encore située dans un domaine de variation prédéfini, en fonction de la valeur des facteurs explicatifs.

Dans le cas particulier où l'âge est retenu comme facteur explicatif, le modèle donne la probabilité pour une conduite d'âge t de présenter une profondeur de corrosion supérieure ou égale à z %. Puisque la profondeur maximale de corrosion est nécessairement comprise entre 0 et 100 %, nous avons choisi de représenter ce modèle par une combinaison de deux fonctions. Ainsi, si on définit :

1. $F_1(t)$ comme étant la probabilité que le temps, pour atteindre une profondeur maximale de corrosion de 100 %, soit inférieur à t (ce qui correspond à la probabilité pour une conduite d'âge t de présenter une profondeur maximale de corrosion de 100 %); et

2. $F_2(z,t)$ comme étant la probabilité que la perte de paroi soit inférieure à z % pour une conduite d'âge t qui n'a pas encore atteint une profondeur maximale de corrosion de 100 %.

Alors, la probabilité pour une conduite d'âge t de présenter une profondeur de corrosion supérieure ou égale à z % est donnée par :

$$P(\text{prof}_{\text{corrosion}} > z) = (1 - F_2(z,t))(1 - F_1(t)) + F_1(t) \quad (8)$$

Les fonctions de distributions $F_1(t)$ et $F_2(z,t)$ ont été développées séparément, en tenant compte, pour la première, de toutes les conduites auscultées et, pour la seconde, des conduites sur lesquelles aucune réparation de bris (c.-à-d. aucune perte de 100 %) n'avait été observée. Le détail de ces développements est donné à la section suivante.

4.4 Résultats

4.4.1 Modèle calculant la probabilité d'avoir une perte maximale de 100 % en fonction de l'âge

Tel que mentionné précédemment, la fonction $F_1(t)$ donne la probabilité pour une conduite donnée, en fonte et de diamètre égal à 150 mm, que le temps pour atteindre une profondeur maximale de 100 % (bris) soit inférieur à t . Divers tests nous ont permis de constater que la fonction de distribution qui reproduit bien ce temps est la fonction de Weibull, selon laquelle :

$$F_1(t) = 1 - e^{-\lambda t^\alpha} \quad (9)$$

où λ et α sont les paramètres du modèle, dont la valeur doit être déterminée à partir des données observées, de façon à ce que le modèle reproduise au mieux les observations. Pour les conduites en fonte de la ville de Québec (de diamètre égal à 150 mm), la valeur des paramètres λ et α a été estimée par la méthode du maximum de vraisemblance. Il s'agit d'estimer les valeurs de λ et de α qui maximisent la fonction suivante, dite fonction de vraisemblance :

$$L_1 = \prod_{i \in cd100} F_1(t_i) \prod_{i \notin cd100} (1 - F_1(t_i)) = \prod_{i \in cd100} (1 - e^{-\lambda t_i^\alpha}) \prod_{i \notin cd100} e^{-\lambda t_i^\alpha} \quad (10)$$

où : t_i = âge de la conduite i lors de l'auscultation (ans); et $cd100$ = l'ensemble des conduites qui avaient une profondeur de corrosion maximale de 100 % lors de l'auscultation (c.-à-d. celles sur lesquelles au moins une réparation antérieure a été détectée).

Les paramètres λ et α qui maximisent la fonction L_1 sont les mêmes que ceux qui maximisent le logarithme de L_1 . D'un point de vue pratique, puisqu'il est plus facile de procéder ainsi, on détermine donc la valeur de λ et α qui maximise le logarithme de L_1 , donné par :

$$\log(L_1) = \sum_{i \in cd100} \log(1 - e^{-\lambda t_i^\alpha}) + \sum_{i \notin cd100} (-\lambda t_i^\alpha) \quad (11)$$

De cette façon, en utilisant les données observées sur les 205 conduites auscultées de 150 mm dont la date d'installation est supérieure ou égale à 1960, on obtient les paramètres suivants :

$$\lambda = 5,95 \times 10^{-6} \text{ et } \alpha = 3,1185.$$

Ceci veut donc dire que la probabilité d'avoir atteint une profondeur maximale de corrosion de 100 % pour une conduite d'âge t est de $\left(1 - e^{-5,95 \times 10^{-6} t^{3,1185}}\right)$. Cette équation est illustrée à la figure suivante (Figure 17). Selon ce modèle, l'âge moyen pour l'atteinte d'un premier bris serait de 41 ans.

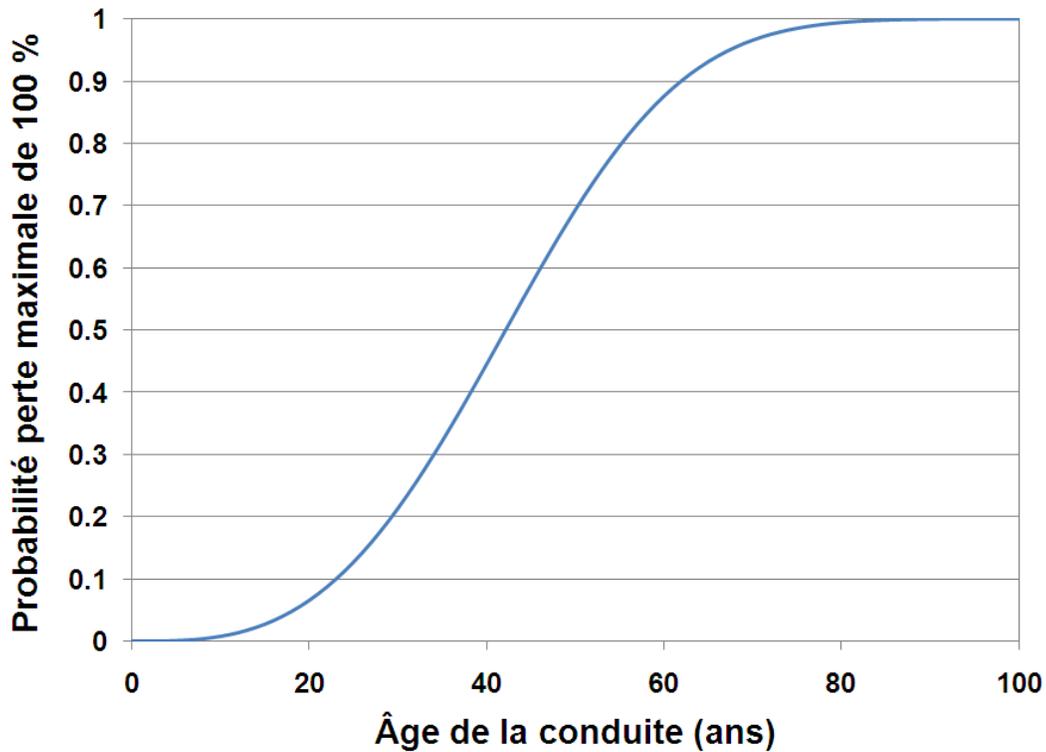


Figure 17. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm de la ville de Québec d'avoir connu une perte maximale de paroi de 100 % en fonction de son âge.

On doit noter que les données utilisées pour construire la figure précédente ont été observées sur des conduites de 19 à 50 ans. Bien que le modèle reproduise très bien les données observées, les valeurs calculées pour des conduites d'âge supérieur à 50 ans doivent donc être considérées comme des extrapolations.

4.4.2 Modèle pour les conduites n'ayant pas de bris observé lors de l'auscultation

La deuxième étape de développement du modèle consiste à développer la fonction $F_2(z, t)$, qui donne la probabilité que la perte de paroi soit inférieure à z % pour une conduite d'âge t , qui n'a pas encore atteint une profondeur maximale de corrosion de 100 %. Pour la mise en place de ce modèle, nous ne tenons compte que des conduites sur lesquelles aucune réparation n'a été observée lors de l'auscultation.

Plusieurs auteurs ont montré que les distributions de valeurs extrêmes permettent de bien reproduire la distribution des profondeurs maximales de corrosion sur des pièces métalliques (conduites ou autres; voir notamment Caleyó *et al.*, 2009; Velazquez *et al.*, 2009, Valor *et al.* 2007 et Sheikh *et al.*, 1990). La loi statistique GEV (*generalized extreme value*) est une des lois les plus générales et répandues pour la représentation de valeurs maximales. Selon cette loi, la probabilité pour une variable aléatoire Z (en l'occurrence, dans le cas qui nous intéresse, la profondeur maximale de corrosion sur une conduite) d'être inférieure à une valeur donnée z est calculée selon l'équation suivante :

$$F(z) = P(Z < z) = \begin{cases} \exp\left[-\left\{1 - \frac{k}{\sigma}(z - \mu)\right\}\right]^{1/k} & \text{si } k \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left\{-\frac{(z - \mu)}{\sigma}\right\}\right] & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad (12)$$

où : k = paramètre de forme; μ = paramètre de localisation; σ = paramètre d'échelle. Le cas particulier où $k = 0$ correspond à la distribution de Gumbel. Dans l'équation précédente, les conditions suivantes doivent être respectées :

$$z < \mu + \frac{\sigma}{k} \quad \text{si } k > 0 \quad \text{ou} \quad z > \mu + \frac{\sigma}{k} \quad \text{si } k < 0 \quad (13)$$

La valeur des paramètres k , μ et σ est estimée à partir des données observées, de façon à ce que le modèle reproduise au mieux les observations.

L'introduction de facteurs explicatifs dans un modèle GEV est possible en faisant varier un ou plusieurs des trois paramètres (k , μ ou σ) en fonction de la valeur prise par ce facteur explicatif. La démarche appliquée pour le cas particulier de la ville de Québec ainsi que les résultats obtenus sont décrits à la section suivante.

4.4.2.1 Prise en compte de l'âge des conduites

Diverses analyses ont été réalisées en vue de déterminer la meilleure façon d'intégrer l'âge des conduites dans le modèle. Ces analyses, dont les résultats détaillés ne sont pas présentés dans ce rapport, consistaient à séparer les conduites par groupes d'âge et à analyser comment les paramètres k , μ et σ de la distribution GEV variaient en fonction de l'âge moyen des conduites de chaque groupe. Ces analyses ont révélé que la valeur du paramètre μ variait linéairement en fonction de l'âge des conduites. Il a donc été choisi de remplacer le paramètre μ de l'équation 12 par l'expression suivante :

$$\mu = \mu_1 \times t + \mu_2 \quad (14)$$

où : t = âge de la conduite (ans).

Ceci mène à la fonction de distribution suivante :

$$F_2(z) = P(Z < z) = \begin{cases} \exp\left[-\left\{1 - \frac{k}{\sigma}(z - (\mu_1 \times t + \mu_2))\right\}\right]^{1/k} & \text{si } k \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left\{-\frac{(z - (\mu_1 \times t + \mu_2))}{\sigma}\right\}\right] & \text{si } k = 0 \end{cases} \quad (15)$$

On note que ce modèle compte quatre paramètres (k , μ_1 , μ_2 et σ). La valeur des paramètres (k , μ_1 , μ_2 et σ) a été estimée par la méthode du maximum de vraisemblance. Il s'agit d'estimer la valeur de k , μ_1 , μ_2 et σ qui maximise la fonction suivante (El Adlouni *et al.*, 2007) :

$$\log(L_2(\mu_1, \mu_2, \sigma, \kappa)) = -n \log \sigma - \left(\frac{1}{\kappa} - 1\right) \sum_{i=1}^n \log \left[1 - \frac{1}{\kappa}(z_i - (\mu_1 \times t_i + \mu_2))\right] - \sum_{i=1}^n \left[1 - \frac{1}{\kappa}(z_i - (\mu_1 \times t_i + \mu_2))\right]^{1/\kappa} \quad (16)$$

où : $\log(L_2)$ = logarithme de la fonction de vraisemblance; n = nombre de conduites prises en compte (138); et z_i = profondeur maximale de corrosion mesurée sur chaque conduite i (en %).

De cette façon, on obtient les paramètres suivants : $k = 0,1561$; $\mu_1 = 0,3229$, $\mu_2 = 9,0205$ et $\sigma = 17,5287$. Avec ce modèle, une distribution de probabilité différente est calculée pour chaque âge de conduite. On peut constater visuellement l'influence de l'âge des conduites sur les résultats du modèle, en traçant la fonction de distribution de probabilité pour différents âges de conduite, comme par exemple pour des conduites de 20 ans et de 50 ans à la Figure 18.

En examinant la Figure 18, il est clair que les conduites plus vieilles ont une plus grande chance de faire face à des profondeurs de corrosion plus élevées. À titre d'exemple, la probabilité, pour une conduite de 150 mm en fonte située sur le territoire de la ville de Québec, de présenter une perte de paroi inférieure à 50 %, si elle n'a pas déjà subi de bris, est de 91 % pour une conduite de 20 ans et de 82 % pour une conduite de 50 ans. D'après le modèle, une conduite de 20 ans a donc plus de chance qu'une conduite de 50 ans d'être en bon état, ce qui correspond à ce que l'on attendait comme résultat.

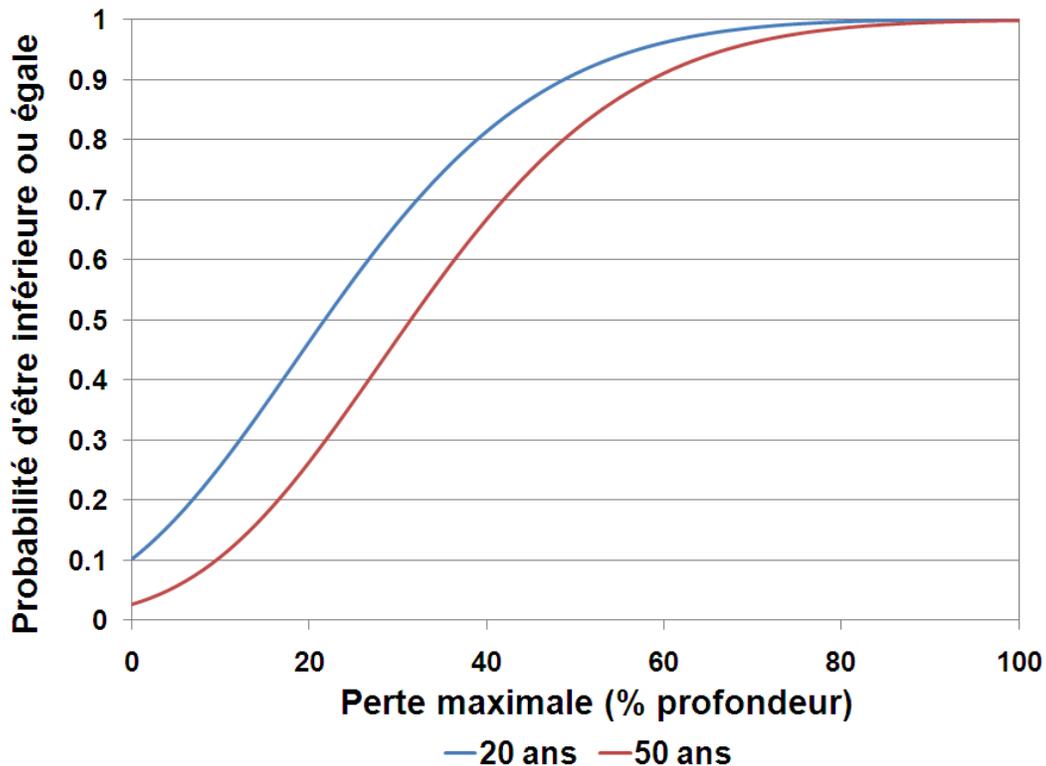


Figure 18. Fonctions de distribution de la perte de paroi pour des conduites de 20 ans et de 50 ans, selon le modèle GEV tenant compte de l'âge des conduites, pour les conduites sur lesquelles aucune réparation n'a été détectée.

4.4.3 Mise en commun des deux modèles

Selon l'équation 8, la combinaison des deux équations développées précédemment permet de calculer, pour toute conduite de fonte de 150 mm de la ville de Québec, la probabilité d'avoir une perte de paroi supérieure à z % en fonction de l'âge de la conduite. Si on répète l'équation 8 en y intégrant le détail des fonctions $F_1(t)$ et $F_2(z,t)$ ainsi que les valeurs des différents paramètres estimées à partir des résultats d'auscultation, on obtient :

$$P(\text{prof}_{\text{corrosion}} > z) = (1 - F_2(z,t))(1 - F_1(t)) + F_1(t) \quad (17)$$

$$P(\text{prof}_{\text{corrosion}} > z) = \left(1 - \exp \left[- \left\{ 1 - \frac{k}{\sigma} (z - \mu_1 \times t + \mu_2) \right\} \right]^{1/k} \right) * \left(1 - 1 - e^{-\lambda t^\alpha} \right) + \left(1 - e^{-\lambda t^\alpha} \right)$$

$$P(\text{prof}_{\text{corrosion}} > z) = \left(1 - \exp \left[- \left\{ 1 - 0,0089 * (z - 0,3229 \times t + 9,0205) \right\} \right]^{6,406} \right) * \left(-e^{-0,00000595 * t^{3,1185}} \right) + \left(1 - e^{-0,00000595 * t^{3,1185}} \right)$$

Bien que cette formule puisse sembler longue, elle peut facilement être entrée dans un chiffrier et sa valeur ainsi facilement calculée pour différentes profondeurs de paroi (z) et différents âges de conduite (t).

Le modèle qui en résulte est illustré à la Figure 19 pour les conduites de 20 ans, 30 ans, 40 ans et 50 ans; cette figure donne la probabilité, pour une conduite d'âge t donné, d'avoir une perte de paroi par corrosion supérieure ou égale à z %.

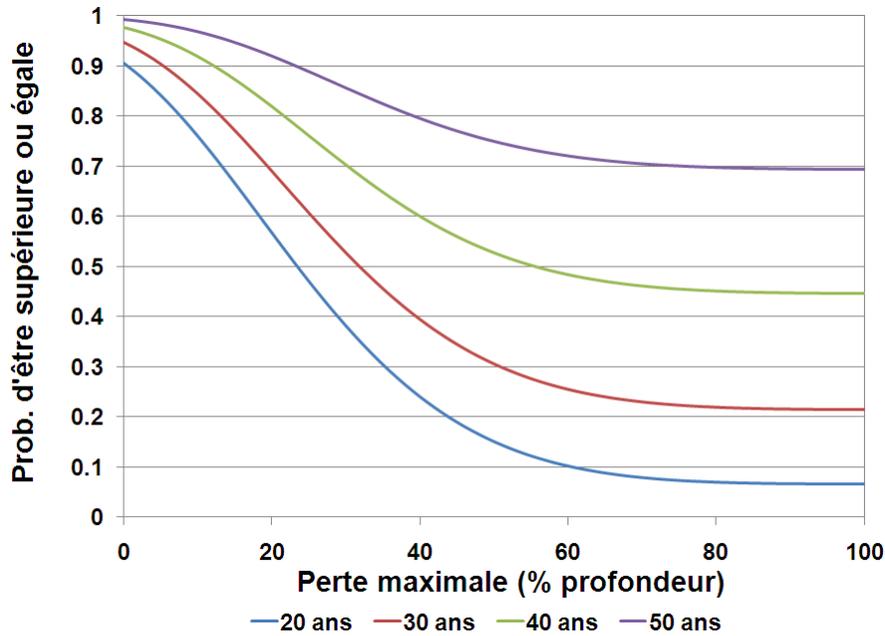


Figure 19. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm de la ville de Québec d'avoir une perte de paroi par corrosion supérieure à z %, pour des conduites de 20, 30, 40 et 50 ans.

Le modèle ainsi construit permet de calculer diverses probabilités et intervalles de confiance. À titre d'exemple, le Tableau 7 donne la probabilité, pour une conduite en fonte, de présenter une perte de paroi supérieure à 80 % en fonction de son âge.

Tableau 7. Probabilité pour une conduite en fonte de 150 mm à Québec de présenter une perte de paroi par corrosion supérieure à 80 %.

Âge de la conduite (ans)	Probabilité d'avoir une perte de paroi supérieure à 80 %
20	7 %
30	22 %
40	45 %
50	70 %
60	88 %
70	97 %
80	99 %
90	100 %
100	100 %

On doit noter que les résultats présentés au Tableau 8 ont été obtenus avec un modèle développé à partir d'observations sur des conduites de 19 à 50 ans. Les valeurs calculées pour des âges supérieurs à 50 ans, en grisé, doivent donc être considérées comme des extrapolations.

Quant au Tableau 8, il donne les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 50 % de la perte de paroi attendue en fonction de l'âge de la conduite. Les résultats présentés dans ce tableau signifient, à titre d'exemple, qu'une conduite en fonte de 150 mm, située sur le territoire de la Ville de Québec, et qui a 20 ans, a 50 % de chance que sa perte de paroi maximale par corrosion varie entre 10 % et 39 %.

Tableau 8. Bornes inférieure et supérieure de l'intervalle de confiance à 50 % de la perte de paroi en fonction de l'âge d'une conduite en fonte de 150 mm à Québec.

Âge de la conduite (ans)	Borne inférieure	Borne supérieure
20	10 %	39 %
30	16 %	61 %
40	26 %	100 %
50	50 %	100 %

5. Conclusion

La première conclusion de ce projet a été de démontrer que la technique d'auscultation par champ lointain d'Aqua Diag donne une bonne représentation de l'état général des conduites d'eau potable en fonte. Cet outil fournit donc des informations utiles pour la planification du remplacement et/ou de la réhabilitation de conduites. Aussi, cette conclusion permet d'utiliser les résultats d'auscultation d'Aqua Diag pour le développement d'un modèle de prédiction de la détérioration par corrosion des conduites d'eau potable en fonte.

Les recherches réalisées pendant ce projet ont permis de constater qu'aucune équation standard n'a été appliquée à grande échelle jusqu'à ce jour pour prédire la corrosion de conduites d'eau potable. Cet état de fait est dû au manque de données, mais surtout au caractère aléatoire du processus de corrosion. Ainsi, l'approche stochastique (probabiliste) est celle qui semble la plus prometteuse pour représenter de façon mathématique les profondeurs de corrosion. Dans le cadre de ce projet, nous avons donc développé un modèle de type stochastique qui calcule, pour les conduites d'eau potable en fonte de 150 mm de la ville de Québec, la probabilité d'avoir une perte maximale par corrosion qui se situe dans un intervalle donné de valeurs possibles. En raison des données disponibles, seul l'âge de la conduite a été retenu pour calculer cette probabilité. En effet, même s'il est reconnu que les caractéristiques du sol ont un effet significatif sur le taux de corrosion des conduites qui y sont enfouies, celles-ci n'ont pas pu être retenues dans le modèle développé pour la ville de Québec puisque les caractéristiques du sol n'étaient pas connues dans l'environnement immédiat des conduites auscultées. Ainsi, aucune corrélation significative n'a pu être observée entre les profondeurs de corrosion observées sur les conduites auscultées et les caractéristiques du sol au voisinage des conduites. Par ailleurs, le modèle mis en place permet de bien reproduire la distribution des profondeurs de corrosion observées en fonction de l'âge des conduites. L'équation développée est simple et peut facilement être résolue sur un chiffrier. Bien que cette équation s'applique au réseau à partir duquel il a été développé, soit celui des conduites d'aqueduc en fonte de 150 mm de la ville de Québec, la méthodologie construite pour développer cette équation (et dont les détails sont donnés dans ce rapport) peut être appliquée

sur tout autre réseau pour lequel des observations de profondeurs de corrosion sont disponibles sur un certain nombre de conduites d'âge connu.

6. Références bibliographiques

- Agbenowosi, N.K. (2000) *A Mechanistic Analysis Based Decision Support System for Scheduling Optimal Replacement*. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, Virginia.
- Alamila, J.L. et Sosa, E. (2008). Stochastic modelling of corrosion damage propagation in active sites from field inspection data. *Corrosion Science*, 50: 1811-1819.
- Blindu, I. (2004). Outil d'aide au diagnostic du réseau d'eau potable pour la ville de Chisinau par analyse spatiale et temporelle des dysfonctionnements hydrauliques. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, France.
- Bouzida, N., Duchesne, S. et Villeneuve, J.-P. (2010). *Validation par tomodesimétrie de la technique Aqua Diag pour l'inspection des conduites d'eau potable*. INRS - Centre Eau Terre Environnement, Rapport de recherche No. 1148, Québec, Canada.
- Caleyo, F., Velazquez, J.C., Valor, A, et Hallen J.M (2009). Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study. *Corrosion Science*, 51: 1925-1934.
- Dabosi, F., Béranger G. et Baroux, B. (1994). *Corrosion localisée*. Les Éditions de Physique EDP.
- Darmawan, M.S. et Stewart, M.G. (2007). Spatial time-dependent reliability analysis of corroding pretensioned prestressed concrete bridge girders. *Structural Safety*, 29: 16-31.
- Doyle, G. (2000). *The Role of Soil in the External Corrosion of Cast-Iron Water Mains in Toronto, Canada*. Mémoire de maîtrise, Graduate Department of civil Engineering. University of Toronto, Toronto, Canada.

- Doyle, G., Seica, M.V. et Grabinsky, M.W.F. (2003). The role of soil in the external corrosion of cast iron water mains in Toronto, Canada. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40: 225-236.
- Duchesne, S., N. Bouzida et J.-P. Villeneuve (2011). Performance estimation of a remote field eddy current method for the inspection of water distribution pipes. Accepté pour publication dans le *Journal of Water Resources Planning and Management*. Disponible en ligne (dernière consultation le 7 septembre 2011) : <http://ascelibrary.aip.org/getpdf/servlet/GetPDFServlet?filetype=pdf&id=JWRMXX0000010000010000091000001&idtype=cvips&prog=normal>.
- El Adlouni, S., Ouarda, T.B.M.J., Zhang, X., Roy, R. et Bobée, B. (2007). Generalized maximum likelihood estimators for the nonstationary generalized extreme value model. *Water Resources Research*, 43: W03410, doi:10.1029/2005WR004545.
- Fédération canadienne des municipalités et Conseil national de recherches du Canada (2002). *Détérioration et inspection des réseaux de distribution d'eau*. InfraGuide.
- Gumbel, E.J. (1954). *Statistical Theory of Extreme Values and some Practical Applications*, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series, No. 33. U.S. Government Printing Office, Washington, DC.
- Le, T.H. (2008). *Document de synthèse relatif à une barrière technique de sécurité (BTS)*. Institut National de l'Environnement industriel INERIS, Verneuil-en-Halatte, France. Disponible en ligne (dernière consultation le 7 septembre 2011) : http://www.ineris.fr/badoris/Pdf/liquides_inflammables/Liq_infl_event_explosion_V1.pdf.
- NRCNA, National Research Council of the National Academies (2009). *Review of the Bureau of Reclamation's Corrosion Prevention Standards for Ductile Iron Pipe*. The National Academies Press, Washington, DC. Disponible en ligne (dernière consultation 7 septembre 2011) : <http://www.nap.edu/catalog/12593.html>.
- O'Day, D.K., Weiss, R., Chiavari, S. et Blair, D. (1989). *Water Main Evaluation for Rehabilitation / Replacement*. Guidance manual of AWWA Research Foundation, Denver, CO.

- O'Day, D.K. (1989). External corrosion in distribution systems. *Journal of the American Water Works Association*, 81(10): 44-52.
- Provan, J.W. et Rodriguez III, E.S. (1989). Development of a Markov description of pitting corrosion. *Corrosion*, 45(3): 178-192.
- Rajani, B., Makar, J., McDonald, S., Zhan, C., Kuraoka, S., Jen, C-K., et Viens, M. (2000). *Investigation of Grey Cast Iron Water Mains to Develop a Methodology for Estimating Service Life*. American Water Works Association Research Foundation, Denver, CO.
- Roberge, P.R. (1999). *Handbook of Corrosion Engineering*, 1st edition. McGraw-Hill Professional.
- Romer, A.E., Bell, G.E.C., Duranceau, S.J. et Foreman, S. (2005). *External Corrosion and Corrosion Control of Buried Water Mains*. AWWA Research Foundation.
- Rossum, J.R. (1969). Prediction of pitting rates in ferrous metals from soil parameters. *Journal of the American Water Works Association*, 61: 305-310.
- Seica, M.V., Packer, J.A., Grabinsky, M.W.F. et Adams, B.J. (2002). Evaluation of the properties of Toronto iron water mains and surrounding soil. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29: 222-237. doi: 10.1139/L01-090.
- Sheikh, A.K., Boah, J.K. et Hansen, D.A. (1990). Statistical modelling of pitting corrosion and pipeline reliability. *Corrosion*, 46: 190-197. doi:10.5006/1.3585090.
- Shibata, T. (1996). Statistical and stochastic approaches to localized corrosion. *Corrosion Science*, 52(11): 813-830.
- Sogaard, E. G., Aruna R., Abraham-Peskir, J. et Koch C.B. (2001). Conditions for biological precipitation of iron by *Gallionella ferruginea* in a slightly polluted ground water. *Applied Geochemistry*, 16(9): 1129-1137.

- Stewart, M.G. et Al-Harthy, A. (2008). Pitting corrosion and structural reliability of corroding RC structures: Experimental data and probabilistic analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 93: 373-382.
- Vajo, J.J., Wei, R., Phelps, A.C., Reiner, L., Herrera G.A., Cervantes, O., Gidanian, D., Bavarian, B. et Kappes, C.M. (2003). Application of extreme value analysis to crevice corrosion. *Corrosion Science*, 45: 497-509.
- Valor, A., Caleyó, F., Alfonso, L., Rivas, D. et Hallen, J.M. (2007). Stochastic modeling of pitting corrosion: A new model for initiation and growth of multiple corrosion pits. *Corrosion Science*, 49: 559-579.
- Velazquez, J.C., Caleyó, F., Valor, A. et Hallen, J.M. (2009). Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines. *Corrosion*, 65(5): 332-342.

ANNEXE 1 – Validation de la technique Aqua Diag

**VALIDATION PAR
TOMODENSITOMÉTRIE DE LA
TECHNIQUE AQUA DIAG POUR
L'INSPECTION DES CONDUITES D'EAU
POTABLE**

Rapport No 1148

Avril 2010

**VALIDATION PAR TOMODENSITOMÉTRIE DE LA TECHNIQUE AQUA DIAG POUR
L'INSPECTION DES CONDUITES D'EAU POTABLE**

Rapport No 1148

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

Nabila Bouzida
Sophie Duchesne
Jean-Pierre Villeneuve

Avril 2010

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
RÉSUMÉ.....	IX
1. INTRODUCTION.....	1
2. MÉTHODOLOGIE.....	5
2.1 Tuyaux analysés.....	5
2.2 Technique non destructive RF pour l'inspection des conduites d'eau potable.....	5
2.2.1 Principe de fonctionnement de la technique RF.....	6
2.3 L'analyse par tomodynamomètre (CT Scan).....	8
2.3.1 Atténuation des rayons X par la matière.....	10
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	21
3.1 Validation préliminaire de l'analyse par tomodynamomètre.....	21
3.2 Comparaison des résultats d'inspection par champ lointain sur le terrain et au laboratoire.....	23
3.3 Comparaison des résultats des deux techniques.....	23
4. CONCLUSION.....	29
5. REMERCIEMENTS.....	31
6. ANNEXE.....	33
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 Schéma de la sonde à champ lointain (pas à l'échelle)	6
Figure 2 Disposition des tuyaux inspectés au laboratoire par la méthode de champ lointain	8
Figure 3 Tomodensitomètre de 3 ^e génération	9
Figure 4 (a) Coupe transversale d'un scan du tuyau neuf « NEW-PIPE »; et (b) profil horizontal. Les lignes grises verticales représentent la paroi du tuyau	12
Figure 5 Illustration de la méthode développée pour la correction des artefacts	14
Figure 6 Illustration du principe du déroulement du tuyau pour la création de l'image-plan	17
Figure 7 Exemple de l'Image-plan pour le tuyau neuf « NEW-PIPE »	17
Figure 8 Exemple de l'Image-plan pour le tuyau corrodé « SILL-MAG-1A »	18
Figure 9 Pourcentage moyen de perte de paroi pour le tuyau neuf « NEW-PIPE »	19
Figure 10 Illustration du principe utilisé par Aqua Diag pour l'estimation de la perte de paroi moyenne. La zone de sensibilité étant de 100 mm par 360°	20
Figure 11 Coupe transversale fournie par le tomodensitomètre et photo agrandie de la zone corrodée du tuyau « SILL-MAG-1A »	22
Figure 12 Pourcentage de perte de paroi couvrant 2 % de la zone de sensibilité (Tuyau « Sill-MAG-1A »)	22
Figure 13 Image-plan du tuyau "LHSTCH-MC"	24
Figure 14 Pourcentage moyen de perte de paroi le long du tuyau « LHSTCH-MC » : a) pour 13 % de couverture de la zone de sensibilité; et b) pour 24 % de la zone de sensibilité.....	25

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Caractéristiques des tuyaux analysés.....	5
Tableau 2 Spécifications de la numérisation pour chaque tuyau.....	11
Tableau 3 Récapitulatif des résultats de comparaison.....	27

Résumé

La technique d'inspection non destructive par champ lointain (RF pour *Remote Field*) permet l'auscultation *in situ* des conduites métalliques d'aqueduc. Cet outil fournit l'emplacement et l'étendue des défauts de corrosion sur les conduites auscultées. La compagnie d'inspection Aqua Diag effectue ce type d'inspection sur les conduites des villes du Québec depuis 2003. La capacité de cet outil à détecter les défauts de corrosion est évaluée dans le présent document en faisant une comparaison de ses résultats avec ceux obtenus sur la base de l'analyse d'images fournies par numérisation des tuyaux à l'aide d'un tomodensitomètre (*CT Scan*). La localisation et les caractéristiques des défauts identifiés par l'outil RF et par les images de tomodensitométrie ont été comparées pour six (6) tuyaux en fonte. Une méthode originale est proposée pour l'analyse des images du tomodensitomètre, à partir de laquelle les pertes d'épaisseur de paroi ont été estimées. Le principe utilisé découle du fait que le coefficient d'atténuation des rayons X dans un matériau homogène est une fonction linéaire de sa densité. Les résultats ont montré que l'outil RF est en mesure de localiser la plupart des défauts identifiés à partir de l'analyse des images tomodensitométriques. Ces résultats révèlent que la sonde testée et utilisée par la compagnie d'inspection Aqua Diag fournit des informations fiables sur les principaux défauts de corrosion, et donc sur l'intégrité structurelle générale des tuyaux inspectés.

1. INTRODUCTION

Le vieillissement des systèmes d'aqueduc entraîne des frais chaque année pour leur remplacement et/ou réparation. En 2001, *The American Water Works Association (AWWA)* a prédit des dépenses de l'ordre de 250 milliards de dollars US au cours des 30 prochaines années pour le remplacement des conduites d'eau potable et des structures associées aux États-Unis (AWWA, 2001). Selon Burn *et al.*, (2007), les dépenses annuelles mondiales pour l'entretien et la réhabilitation des conduites d'eau potable s'élèvent à plus de 33 000 M \$US/an. Ce montant devrait augmenter considérablement à l'avenir, étant donné que les structures actuellement en place atteignent de plus en plus la fin de leur durée de vie utile.

Ce contexte a conduit, au cours des dernières décennies, au développement de différents modèles de prédiction et d'outils de planification pour le renouvellement des conduites d'eau (voir par exemple les pionniers Shamir et Howard 1979 ou, plus récemment, Kleiner et Rajani, 2010; Dridi *et al.*, 2009; Giustolisi et Berardi, 2009; Mailhot *et al.*, 2003; Pelletier, 2000). Bien que ces outils et les modèles développés soient nécessaires pour identifier les conduites à remplacer et/ou réhabiliter en priorité sur un réseau donné, la décision de remplacer un tuyau ou non est souvent basée sur divers facteurs. Parmi ces facteurs, citons les conséquences du bris de conduite, l'accessibilité, les contraintes budgétaires, l'intervention sur d'autres réseaux au même endroit ainsi que les résultats d'inspection. Plusieurs méthodes non destructives permettent d'inspecter les conduites d'aqueduc. Les méthodes soniques et acoustiques (voir Fuchs et Riehle, 1991) sont les plus souvent utilisées en Amérique du Nord pour localiser les fuites (Makar et Chagnon, 1999). Cependant, ces techniques peuvent identifier un problème sur une conduite seulement après qu'un bris se soit produit et, par conséquent, ne peuvent pas identifier les endroits où des fuites sont susceptibles de survenir dans le futur.

Puisque la corrosion est la cause principale de la détérioration des conduites en fonte (Agbenowosi, 2000; Rajani, 2000), des techniques d'inspection spécifiques ont été développées pour détecter les points ou sites de corrosion sur les conduites métalliques (Dingus *et al.*, 2002). Ces techniques peuvent jouer un rôle important dans la planification et le renouvellement des systèmes de distribution d'eau. En effet, en 1992 plus de deux tiers (2/3) de toutes les conduites d'eau existantes aux États-Unis étaient métalliques (Kirmeyer *et al.*, 1994, cité dans Kleiner et Rajani, 2001); aujourd'hui, même si le PVC (*PolyVinyl Chloride*) est le matériau le plus populaire pour les nouvelles conduites d'eau potable en Amérique du Nord, la plupart des tuyaux de petit diamètre qui ont été installés jusque dans les années 1990 sont en fonte. Cela signifie que la

grande majorité des conduites qui devraient être remplacées dans les années à venir sont métalliques.

Depuis les années 1990, les techniques d'inspection par champ lointain (RF pour *Remote Fied*) ont été adaptées pour l'auscultation des conduites en fonte grise et ductile (Dingus *et al.*, 2002). Ces techniques peuvent être utilisées *in situ* pour fournir l'épaisseur résiduelle des tuyaux en fonte sur toute leur longueur. Dans certaines villes, comme la Ville de Québec (Canada), le résultat de ces inspections est l'un des facteurs de décision pris en compte pour le remplacement de conduites. Toutefois, en raison de l'absence d'information concernant sa capacité à bien estimer l'état réel de la paroi des conduites, certains gestionnaires de réseaux d'aqueduc restent réticents face à cette technique et préfèrent ne pas baser leurs décisions d'investissement sur les résultats de ce type de technique.

Même si quelques tests de validation de la technique des champs lointains ont été réalisés durant les années 1990, certains rapports restent confidentiels (par exemple, McDonald et Makar, 1996) tandis que d'autres présentent une méthodologie et/ou des résultats partiels (Koutsakos *et al.*, 1997; Staples, 1996; Ferguson *et al.*, 1996; Skabo et Jackson, 1991). Dans toutes ces études, les conduites sont d'abord inspectées sur place avec une sonde RF; une classe de condition ou une probabilité de rupture est ensuite attribuée aux sections de ces conduites en se basant sur les résultats d'inspection. Certaines de ces sections sont par la suite excavées, sablées (pour enlever tout produit de graphitisation) et se voient affecter une classe de condition ou une probabilité de défaillance à partir de l'inspection visuelle. Selon les auteurs de ces études, les résultats obtenus avec l'inspection visuelle et la technique des champs lointains (RF) correspondent bien, même si la méthode suivie pour l'obtention de ces résultats est présentée vaguement dans les articles en question. Seule la corrosion externe est prise en compte pour ces analyses, étant donné que la corrosion interne et la graphitisation dissimulée à l'intérieur de la paroi du tuyau ne peuvent pas être détectées par une inspection visuelle.

Dans Dingus *et al.*, (2002), deux types de sondes RF ont été testés. Les sondes ont d'abord été utilisées pour inspecter des tuyaux sur le terrain (sous le sol). Ces derniers ont ensuite été excavés et nettoyés afin de mettre en évidence les défauts internes et externes. Cette procédure a révélé que les deux sondes RF testées ont été en mesure de détecter la plupart des défauts de corrosion; cependant, dans cette étude, aucune information n'est été donnée sur la profondeur ni sur l'étendue spatiale des défauts détectés.

Plusieurs techniques d'inspection non destructives sont actuellement disponibles pour identifier, localiser et estimer la taille des défauts de tuyaux excavés (par exemple les techniques de radiographie ou par ultrasons). L'utilisation de ces méthodes peut pallier les lacunes des études précédentes et fournir une évaluation plus approfondie des performances de la technique RF pour l'inspection des conduites d'eau. Les travaux présentés dans le présent document ont été spécialement réalisés pour évaluer la performance d'une sonde électromagnétique à champs lointains commercialement disponible pour l'inspection des conduites en fonte dans l'Est du Canada. Les résultats fournis par le prestataire de services (Aqua Diag), concernant la dimension des points de corrosion et leur emplacement, ont été comparés aux estimations de ces valeurs basées sur le traitement d'images de tomographie (CT Scan) de ces mêmes tuyaux.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Tuyaux analysés

Les caractéristiques des tuyaux analysés sont présentées au Tableau 1. Tous ces tuyaux sont en fonte grise et ont été excavés durant l'été 2009, à l'exception de « NEW-PIPE » qui est un tuyau de fonte ductile qui n'a jamais été enfoui.

Tableau 1 Caractéristiques des tuyaux analysés

Nom	Date d'installation estimée (ans)	Âge estimé à l'inspection (ans)	Diamètre (mm)	Longueur (m)	Épaisseur moyenne de paroi (mm)
NEW-PIPE	-	-	150	1,1	7
SILL-MAG-1A	1948	61	200	1,6	14
B-MAN-1A	1909	100	150	2,6	10
B-MAN-1B	1909	100	150	2,5	10
B-MAN-2A	1909	100	150	1,7	12
B-MAN-2B	1909	100	150	1,7	9
LHSTCH-MC	1945	64	150	1,3	7
LHSTCH-HOP	1957	52	150	3,2	8

Seuls les tuyaux de 150 mm de diamètre ont été inspectés avec l'outil RF, puisque la sonde pour l'inspection de tuyaux de cette dimension était la seule disponible au moment des tests. Les deux premiers tuyaux dans le Tableau 1 ont été utilisés pour la validation de la méthode de traitement des images du tomodensitomètre, alors que la comparaison des résultats fournis par la sonde d'inspection RF et l'analyse par tomodensitométrie (*CT Scan*) a été réalisée avec les six derniers tuyaux.

2.2 Technique non destructive RF pour l'inspection des conduites d'eau potable

Les techniques électromagnétiques disponibles pour l'inspection des conduites d'eau sont :

- 1) le contrôle par fuite de flux magnétique (MFL);
- 2) les courants de Foucault;
- 3) la méthode des champs lointains utilisant les courants de Foucault (Costello *et al.*, 2007).

Pour être efficace, la technique MFL exige que l'outil d'inspection, essentiellement composé d'aimants, soit en contact direct avec la paroi du tuyau. Cela rend cette technique inappropriée pour l'inspection des conduites d'eau potable, car leurs parois sont souvent couvertes de tubercules et produits de corrosion. Quant à la technique des courants de Foucault, il est généralement difficile de l'appliquer pour l'inspection des tuyaux métalliques en raison de l'effet (ou épaisseur) de peau^{*}. La technique RFEC, souvent appelée simplement technique de champ lointain (RF), a été développée pour résoudre ce problème (Costello *et al.*, 2007).

La technique RF a d'abord été documentée dans les années 1950 et commercialisée dans les années 1960 (Schmidt, 1984). Les premières applications étaient dédiées à l'inspection des tubes échangeurs de chaleur (Brown et Le 1989, cité dans Koutsakos, 1997). Son application à l'identification des défauts et de leur étendue dans les conduites métalliques de distribution de gaz est bien connue (Robinson, 1998). Dans les années 1990, des outils commerciaux sont devenus disponibles en Amérique du Nord pour l'inspection des conduites d'eau avec la technique RF.

2.2.1 Principe de fonctionnement de la technique RF

Une bobine d'excitation circulaire est placée à l'intérieur du tuyau, les axes de la conduite et la bobine étant parallèles (Makar et Chagnon, 1999). Un récepteur est situé à une distance de 2,5 à 3 fois le diamètre du tuyau par rapport à la bobine excitatrice (Figure 1).

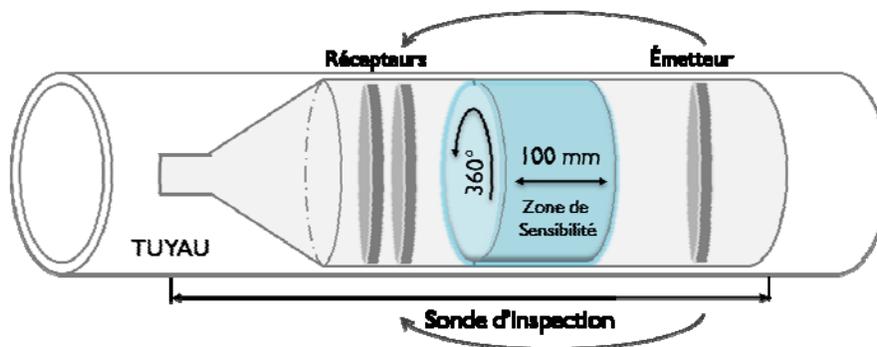


Figure 1 Schéma de la sonde à champ lointain (pas à l'échelle)

L'excitation transmet un champ magnétique à faible fréquence qui se propage le long du tuyau (Dingus *et al.*, 2002). Ce champ magnétique peut atteindre les récepteurs par deux voies, soit

^{*} L'effet de peau ou effet pelliculaire est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs. Il est généralement synonyme de pertes énergétiques et donc considéré comme une nuisance (excepté le cas du freinage par induction). (<http://eleves.mines.inpl-nancy.fr/~lebru8863/Latex1>)

par l'intérieur de la conduite (voie directe), ou par l'extérieur (voie indirecte). Dans ce dernier cas, le champ magnétique passe d'abord à travers la paroi du tuyau depuis l'émetteur, puis de nouveau à travers la paroi, mais cette fois-ci vers l'intérieur, à proximité du récepteur. La force du champ magnétique est atténuée rapidement dans la voie directe (Makar et Chagnon, 1999). À une distance de l'émetteur équivalant à environ 2 fois le diamètre du tuyau, le champ indirect domine le champ direct; c'est ici que commence la zone du champ lointain (Grenier, 2009). La force du champ magnétique dans la voie indirecte n'est pas réduite de manière significative puisque celui-ci se déplace en dehors du tuyau.

Toutefois, les variations dans l'épaisseur de paroi aux endroits où le champ magnétique la traverse (soit de l'intérieur à partir de la bobine excitatrice ou de l'extérieur vers la bobine réceptrice) vont modifier la phase ou l'amplitude du signal, ou même les deux (Dingus *et al.*, 2002). Des analystes expérimentés peuvent ensuite analyser ces modifications de phase et d'amplitude pour estimer la proportion de réduction de l'épaisseur de paroi ainsi que l'étendue du défaut détecté (Schmidt et Atherton, 2002). La technique RF permet la détection des défauts de corrosion interne et externe, ainsi que les défauts situés à l'intérieur de la paroi de la conduite (par exemple des zones de graphitisation dissimulées dans un matériau non altéré). Le champ lointain n'est pas affecté par la présence de tubercules ni par des revêtements non métalliques (Makar et Chagnon, 1999).

La sonde réceptrice de l'outil utilisé dans cette étude se compose de deux récepteurs. La soustraction des signaux produits par chacun des récepteurs permet une localisation plus précise des défauts détectés. La sonde est conçue pour l'inspection des tuyaux de 150 mm de diamètre. La longueur totale de la sonde est d'environ 750 mm, la bobine excitatrice et les deux bobines réceptrices étant distantes de 450 mm. La sonde est conçue pour entrer dans les conduites par les bornes d'incendie, de sorte qu'il n'est pas nécessaire de vidanger les conduites avant l'inspection.

Il existe des sondes pour l'inspection des conduites de diamètre plus élevé, mais elles nécessitent de creuser un puits d'accès et de couper un tuyau pour atteindre le réseau. L'outil commercial utilisé pour cette étude est régulièrement exploité pour inspecter les tuyaux en fonte à Québec (Canada) depuis l'année 2003. Les rapports produits par le fournisseur de services (Aqua Diag) se composent principalement d'une liste d'anomalies détectées (soit un défaut de corrosion ou un joint) avec leur localisation par rapport au début de l'auscultation.

Le pourcentage de perte de paroi du tuyau ainsi que son étendue circumférentielle sont donnés pour chaque défaut de corrosion. La zone de sensibilité de la bobine réceptrice couvre 360° autour du tuyau et une longueur d'environ 100 mm le long de l'axe du tuyau (Grenier, 2009). En fait, l'étendue circumférentielle des défauts donnée comme résultats par Aqua Diag correspond à la proportion de cette zone de sensibilité couverte par le défaut.

Pour le travail présenté dans ce rapport, en raison des difficultés associées à la planification combinée des travaux d'excavation et du travail d'inspection sur place, les tuyaux ont été inspectés dans le laboratoire de l'INRS après leur excavation, selon la configuration illustrée à la Figure 2. Sur cette figure, on voit que les tuyaux sont reliés entre eux et les flèches représentent la direction de la sonde. On peut voir sur cette figure que des petites sections (d'environ 1 m de long) ont été raccordées aux premiers tuyaux inspectés sur les deux lignes (« B-Man-2B » et « LHSTCH-HOP »). Le but était de permettre à l'outil de pouvoir identifier les défauts potentiels situés à l'extrémité gauche de ces tuyaux. En effet, à la fois la bobine excitatrice et la bobine réceptrice doivent être situées à l'intérieur d'un tuyau métallique pour qu'un défaut de corrosion puisse être détecté.

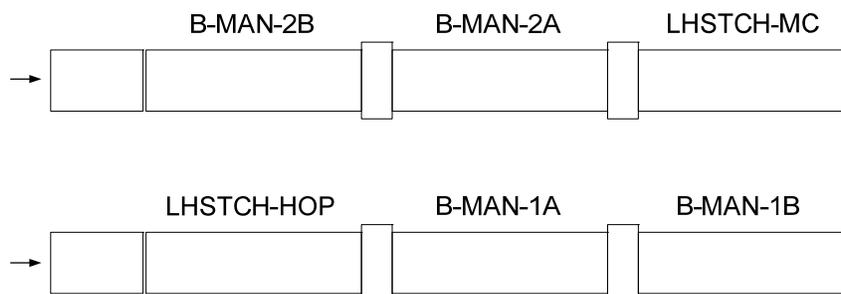


Figure 2 Disposition des tuyaux inspectés au laboratoire par la méthode de champ lointain

L'inspection *in situ* (c.-à-d. tuyau sous le sol et rempli d'eau) et dans le laboratoire ne devraient pas fournir des résultats différents pour un même tuyau, car le champ magnétique dans la zone du champ lointain n'est pas significativement affecté ni par l'eau à l'intérieur du tuyau ni par le sol environnant. Afin de soutenir cette dernière hypothèse, une comparaison des résultats d'inspection d'un même tuyau, d'abord sur le terrain et ensuite en laboratoire, a été réalisée.

2.3 L'analyse par tomodensitomètre (CT Scan)

La tomodensitométrie volumétrique par absorption de rayons X est une technique non destructive qui permet la reconstruction d'images en « coupes » d'un objet à trois dimensions.

Comme illustré à la Figure 3, son principe repose sur l'analyse multidirectionnelle de l'interaction d'un faisceau de rayons X avec la matière, enregistrée par des capteurs de rayonnement transmis après traversée d'un objet (Gerstenmayer et Thiery, 2002).

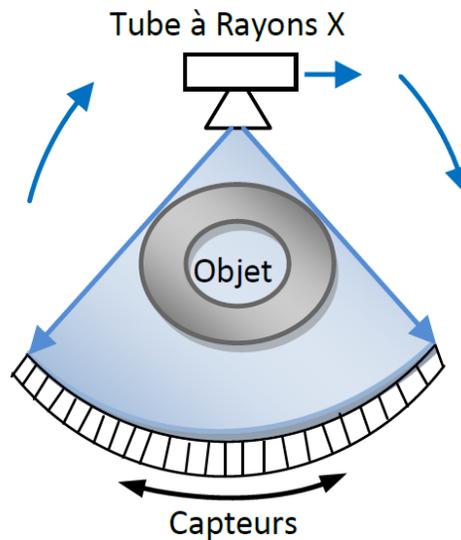


Figure 3 Tomodensitomètre de 3^e génération

Les tuyaux décrits précédemment dans le Tableau 1 ont tous été numérisés avec un scanner médical mobile de troisième génération de type « Siemens Somatom Volume Access » disponible au laboratoire d'analyse multidisciplinaire de l'INRS-ETE. Le pic de kilo-voltage choisi était de 140 kV, ce qui signifie que le tube à rayons X produit des rayons d'énergie variant de 0 à 140 kiloélectronvolts[†] (keV). Les spécifications de chaque analyse de tuyau sont données au

[†] On rappelle que : 1 ev = 1,60218 x 10⁻¹⁹ joules.

Tableau 2. Les images ont été analysées et traitées avec des programmes informatiques développés sous l'environnement Matlab©.

2.3.1 Atténuation des rayons X par la matière

En passant à travers la matière, le faisceau de photons des rayons X produit par le scanner est atténué. L'intensité mesurée N après qu'un faisceau monochromatique ait traversé une couche d'épaisseur x d'un matériau homogène est donnée par la loi de Lambert-Beer (Beutel *et al.*, 2000) :

$$N = N_0 e^{-\mu x} \quad (1)$$

où N_0 est le rayonnement incident et μ est appelé le coefficient d'atténuation linéaire. Ce coefficient intègre tous les mécanismes d'interaction entre le rayonnement et le matériau et dépend linéairement de la densité de la matière (Beutel *et al.*, 2000).

Tableau 2 Spécifications de la numérisation pour chaque tuyau

Nom	Taille du Pixel (mm)	Épaisseur de coupe (mm)	Espace entre coupes (mm)
NEW-PIPE	0,492	1	0,7
SILL-MAG-1A	0,517	1	0,7
B-MAN-1A	0,492	1	0,7
B-MAN-1B	0,492	1	0,7
B-MAN-2A	0,492	1	0,7
B-MAN-2B	0,492	1	0,7
LHSTCH-MC	0,449	1	0,7
LHSTCH-HOP	0,431	1	1,0

Les chiffres donnés comme sortie du tomodensitomètre sont des valeurs de coefficients d'atténuation modifiées selon la formule suivante (Kak et Slaney, 1988) :

$$HU = \frac{\mu - \mu_{water}}{\mu_{water}} \times 1000 \quad (2)$$

où μ_{eau} est le coefficient d'atténuation de l'eau. Les valeurs de μ pour l'objet scanné et pour l'eau sont reliées à l'énergie effective du scanner. Les HU sont des nombres entiers allant de -1 000 à 3 000 et sont communément appelés unités Hounsfield (Hounsfield étant l'inventeur de la technique de diagnostic par tomodensitomètre). Un scanner parfaitement calibré donnerait une valeur de $HU = 0$ pour l'eau et $HU = -1 000$ pour l'air. Les images du tomodensitomètre utilisé dans cette étude sont enregistrées dans le format standard médical DICOM 3.0 (*Digital Imaging and Communications in Medicine*). Lorsque visualisées sous l'environnement Matlab®, ces valeurs sont linéairement transformées avec l'équation suivante :

$$valeur_pixel = \frac{HU + 10240}{10} \quad (3)$$

La Figure 4 montre un exemple d'une section transversale du tuyau « NEW-PIPE » avec les valeurs de pixels d'un profil horizontal passant à travers le centre de la section. Comme l'épaisseur moyenne de paroi pour ce tuyau mesurée en laboratoire est d'environ 7 mm et la taille d'un pixel est de 0,492 mm, le matériau du tuyau devrait couvrir environ 14 pixels de chaque côté du profil horizontal.

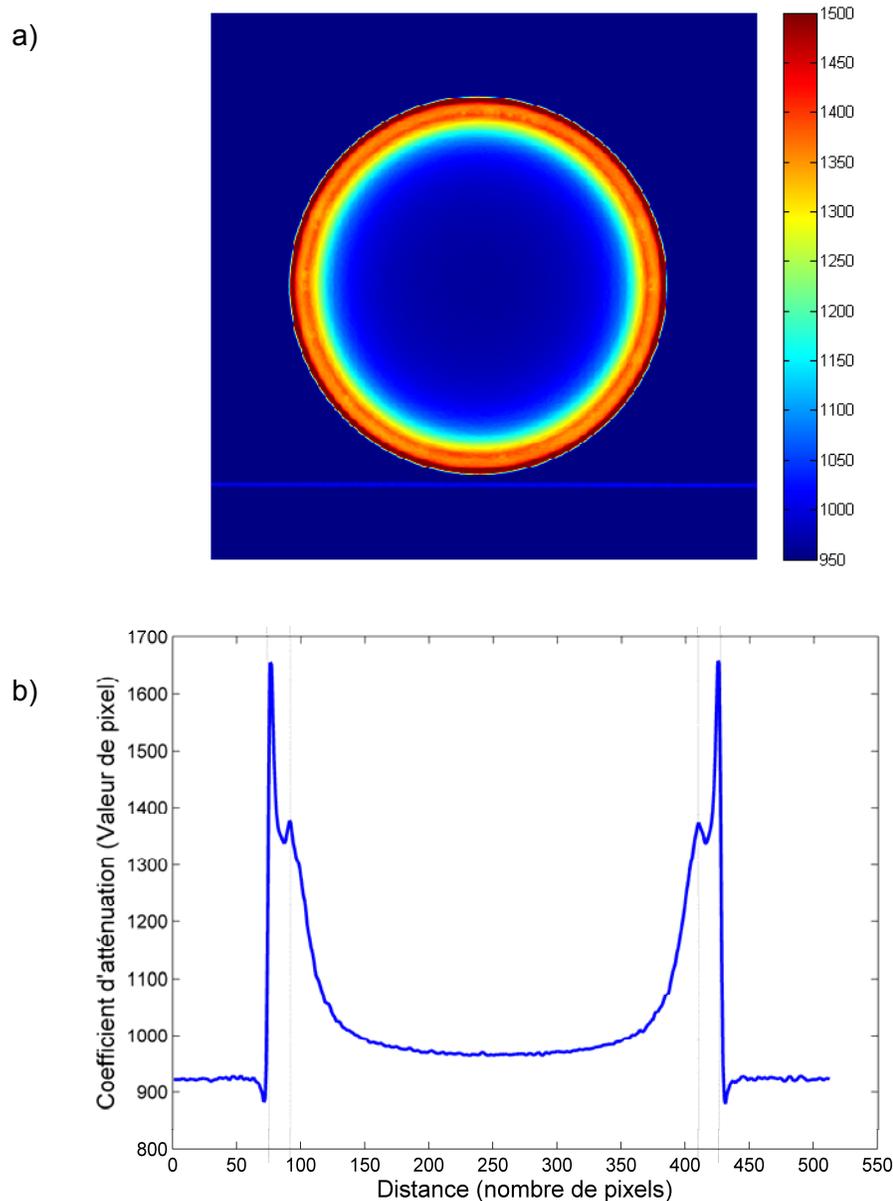


Figure 4 (a) Coupe transversale d'un scan du tuyau neuf « NEW-PIPE »; et (b) profil horizontal. Les lignes grises verticales représentent la paroi du tuyau

En observant la Figure 4b, on remarque que :

- 1) le profil des pixels à l'intérieur du matériau n'est pas homogène et les valeurs des pixels de l'air sont plus élevées à l'intérieur de la section (~ 965) qu'à l'extérieur (~ 925);
- 2) sur la paroi interne du tuyau (environ aux pixels 90 et 411), la valeur du pixel de l'air est proche de la valeur du matériau et diminue progressivement vers le centre de la conduite;
- 3) les valeurs des pixels du matériau présentent un premier pic sur la paroi externe du tuyau (environ aux pixels 76 et 425) et un second pic plus bas à la paroi interne du tuyau.

Les remarques 1) et 2) sont des artéfacts dus au phénomène de durcissement du faisceau qui se produit lorsque le faisceau incident n'est pas monochromatique. Le faisceau polychromatique provoque une atténuation préférentielle des photons de faible énergie lors de leur passage à travers le matériau (Hopkins *et al.*, 2004). En effet, puisque l'atténuation à un point fixe dans l'espace varie pour des photons de différentes énergies, le spectre du faisceau des rayons X est modifié lorsqu'il traverse l'objet numérisé (Herman, 1979).

Le phénomène de durcissement du faisceau (*Beam Hardening* en anglais) est l'un des nombreux artéfacts qui peuvent altérer les résultats de la tomodensitométrie volumétrique. Le durcissement du faisceau et autres artéfacts, tels que les stries (*streaks*) sur les coins de l'objet et les cercles (*rings*) entourant l'objet numérisé, dépendent de l'interaction de ce dernier avec la forme d'énergie utilisée (Kak et Slaney, 1988). D'autres artefacts proviennent de la méthode appliquée pour la reconstruction des images. Le phénomène de Gibbs, les stries et l'effet de Moiré sont des erreurs de ce type. Le phénomène de Gibbs vient de la représentation de Fourier d'un processus discontinu. Ce phénomène provoque une légère diminution de la valeur d'un pixel de l'air à l'extérieur de la paroi de la conduite (autour des pixels 71 et 431) et devrait produire une augmentation similaire (amplitude et étendue) dans le matériau du tuyau. Cependant, on voit à la Figure 4b que l'augmentation dans le matériau est beaucoup plus élevée que la diminution correspondante dans l'air.

L'augmentation dans le matériau de la conduite est donc probablement due en partie au phénomène de Gibbs, mais aussi au fait que le matériau est réellement plus dense sur le côté externe de la paroi de la conduite, en raison du procédé de fabrication par centrifugation des tuyaux en fonte. En résumé, le profil non homogène des valeurs des pixels à l'intérieur du matériau du tuyau est probablement dû à différents facteurs qui comprennent les nombreux artéfacts du tomodensitomètre ainsi que le gradient de densité de matière de l'extérieur vers l'intérieur de la paroi de la conduite. Des informations théoriques sur les artéfacts du

tomodensitomètre peuvent être trouvées dans Kak et Slaney (1988), Hopkins *et al.*, (2004) ou Herman (1979).

Les valeurs brutes fournies par le tomodensitomètre ont été corrigées afin de réduire ces inhomogénéités avant le calcul des pertes d'épaisseur de paroi. La méthode de correction développée est illustrée à la Figure 5 pour la partie gauche du profil représentée à la Figure 4b. Cette méthode est composée de trois étapes principales : 1) construction d'une courbe de régression pour les valeurs de pixels à partir des pixels situés près du bord externe de la paroi de la conduite; 2) calcul des valeurs de correction de cette régression; et 3) application des valeurs de correction à tous les pixels situés à l'intérieur de la paroi de la conduite. Les valeurs des pixels qui sont en dehors de la paroi de la conduite (air) n'ont pas été corrigées, puisque ces dernières ne sont pas utilisées pour l'estimation subséquente des pertes de paroi des tuyaux.

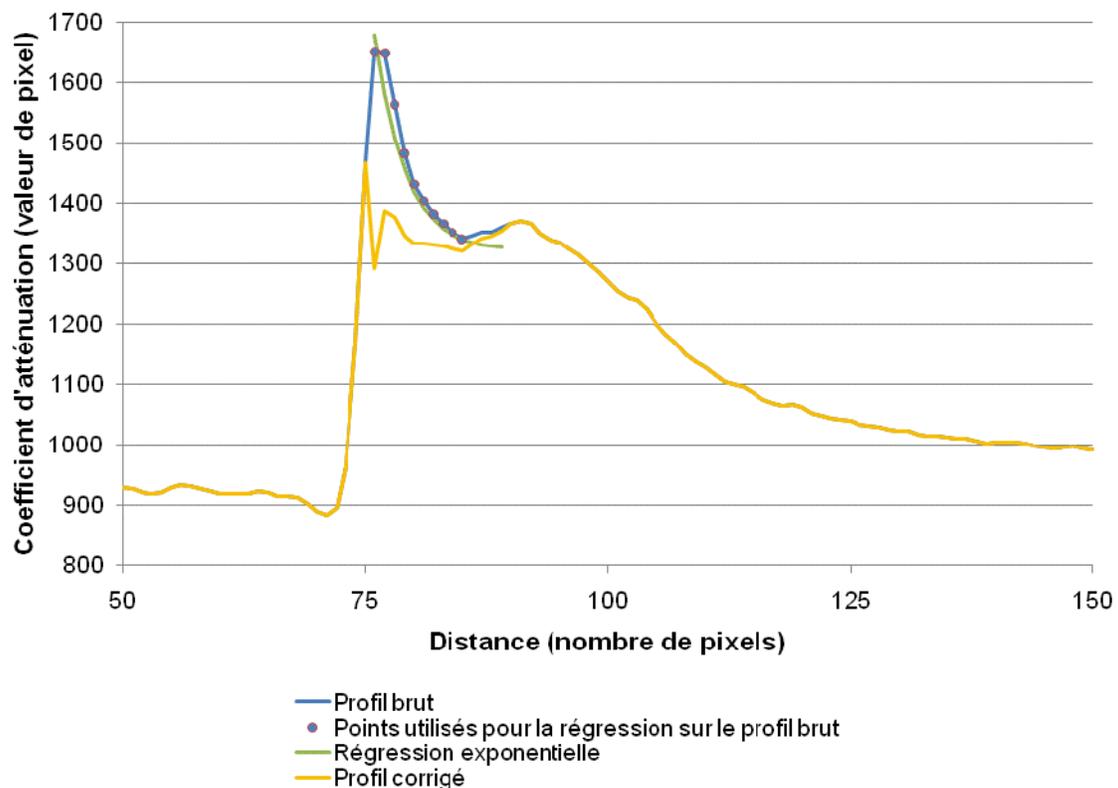


Figure 5 Illustration de la méthode développée pour la correction des artéfacts

La courbe de régression a été construite en utilisant tous les points du profil à partir du point présentant le coefficient d'atténuation maximal (pixel 76 de la Figure 5) jusqu'au point ayant le coefficient d'atténuation minimal à l'intérieur de la paroi de la conduite (pixel 85 de la Figure 5).

Ces points sont identifiés avec de gros points rouges dans la même figure. La régression a été construite en minimisant la somme des erreurs quadratiques entre les valeurs brutes des pixels et les valeurs données par :

$$pv_{reg} = A + B \exp(-Cx) \quad (A.1)$$

où pv_{reg} est la valeur du pixel calculée avec la régression, à une distance de x pixels à partir du premier point pris en compte et où A , B et C sont les coefficients de régression.

La courbe de régression obtenue pour le profil donné comme exemple est illustrée en vert à la Figure 5.

Les valeurs de correction ont été calculées en soustrayant l'asymptote de la régression aux valeurs de la régression. Cela conduit à :

$$\Delta pv = B \exp(-Cx) \quad (A.2)$$

où Δpv est la valeur de correction pour un pixel situé à une distance de x pixels du premier point pris en compte. Enfin, tous les coefficients d'atténuation pour les points situés à l'intérieur de la paroi du tuyau (du pixel 76 à 89 de la Figure 5) ont été modifiés suivant l'équation suivante :

$$pv_{corr} = pv - \Delta pv \quad (A.3)$$

où pv_{corr} est la valeur du pixel corrigée et pv la valeur du pixel donnée par le tomodensitomètre. À titre d'exemple, les données brutes du scanner sont représentées par la ligne bleue dans la Figure 5, alors que les données corrigées sont illustrées par la ligne jaune. En dehors de la paroi de la conduite (avant le pixel 76 et après le pixel 89), les deux courbes se chevauchent puisque les valeurs des pixels de l'air n'ont pas été modifiées.

La méthode de correction a été appliquée pour tous les profils pris en compte pour le calcul de la perte d'épaisseur de paroi. Pour chaque image, quatre (4) courbes de correction exponentielle ont été calculées (à 0° , 90° , 180° et 270°) et les moyennes des coefficients A , B et C ainsi calculées ont été retenues pour la correction de tous les profils dans cette image spécifique. Cette méthode de correction a été créée afin d'homogénéiser les valeurs des pixels à l'intérieur de la paroi du tuyau. Il s'agit d'une méthode simplifiée dont l'intention n'est pas de

fournir les coefficients d'atténuation réels pour tous les pixels du tuyau numérisé, mais plutôt de fournir des valeurs qui seront utilisées pour estimer la perte de paroi sur toute la longueur du tuyau.

L'estimation de l'épaisseur de paroi sur toute la longueur du tuyau à partir des images corrigées du tomodensitomètre est basée sur le principe selon lequel le coefficient d'atténuation est une fonction linéaire de la densité du matériau (Beutel *et al.*, 2000; Zhou *et al.*, 2009). Ce principe a déjà été utilisé dans de nombreuses applications, comme par exemple l'estimation de la densité du bois (Lindgren, 1991) ou de la densité osseuse (Hangartner et Overton, 1982). Pour l'appliquer à notre travail, on suppose ici que la composition chimique de la conduite ne varie pas d'une manière considérable sur la longueur ni sur la paroi du tuyau.

Puisque l'objectif principal de la méthode de traitement d'image est de valider les résultats fournis par la technique d'inspection RF, cette méthode doit fournir le même type de résultats que ceux donnés dans les rapports d'inspection RF. Les images tomodensitométriques des tuyaux ont donc été traitées de manière à faire des estimations sur : 1) la perte d'épaisseur, tout le long du tuyau, en termes de pourcentage de matière perdue sur une zone de sensibilité de 100 mm; et 2) l'étendue spatiale de cette perte. Cette procédure a été divisée en deux étapes principales : 1) l'estimation, sur toute la longueur du tuyau, du pourcentage de perte moyenne sur une zone de sensibilité couvrant 100 mm par 360°; et 2) l'estimation, sur toute la longueur du tuyau, du pourcentage de perte le plus élevé sur certaines proportions prédéfinies de la zone de sensibilité de 100 mm par 360°.

La première étape est divisée en quatre sous étapes. Tout d'abord, pour toutes les images qui composent un tuyau numérisé (chaque image correspond à une coupe transversale), la valeur moyenne des pixels corrigés à travers la paroi du tuyau a été calculée pour 180 angles différents (2° d'écart entre chaque angle). Cela produit ce que nous appelons l'image-plan, qui est une représentation « déroulée » de la moyenne des valeurs de pixels à travers la paroi du tuyau autour de la circonférence de la conduite et sur toute sa longueur. Le principe de l'image-plan est illustré à la Figure 6. La Figure 7 illustre l'image-plan du tuyau « NEW-PIPE », alors que celui du tuyau « SILL-MAG-1A » est donné à la Figure 8. On remarque sur cette figure que ce dernier tuyau, installé en 1909 et excavé en 2009, présente plusieurs points de corrosion et même quelques trous.

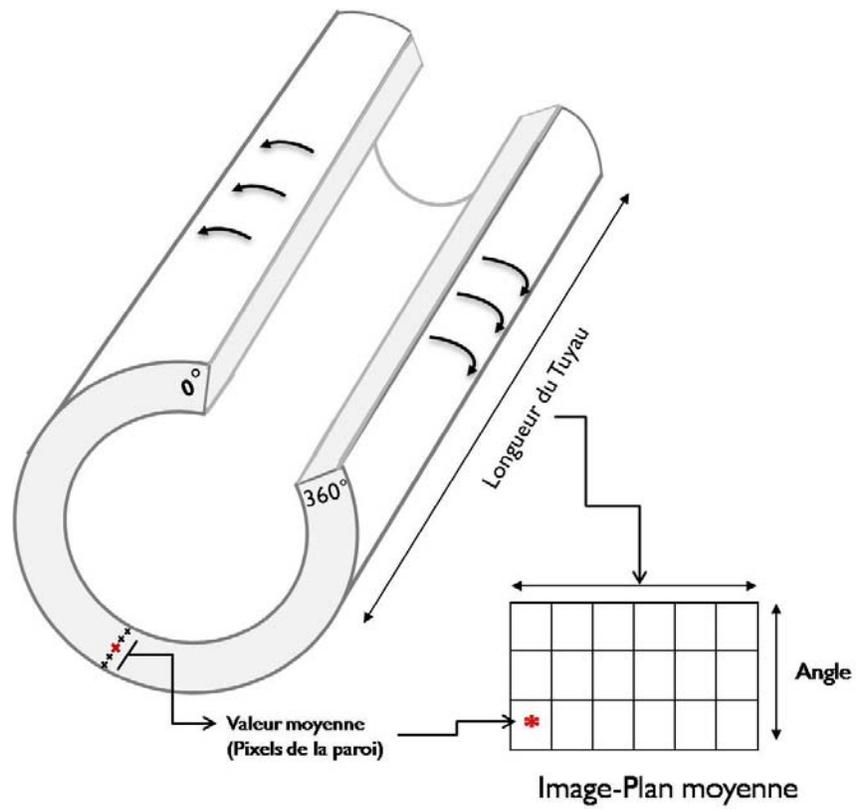


Figure 6 Illustration du principe du déroulement du tuyau pour la création de l'image-plan

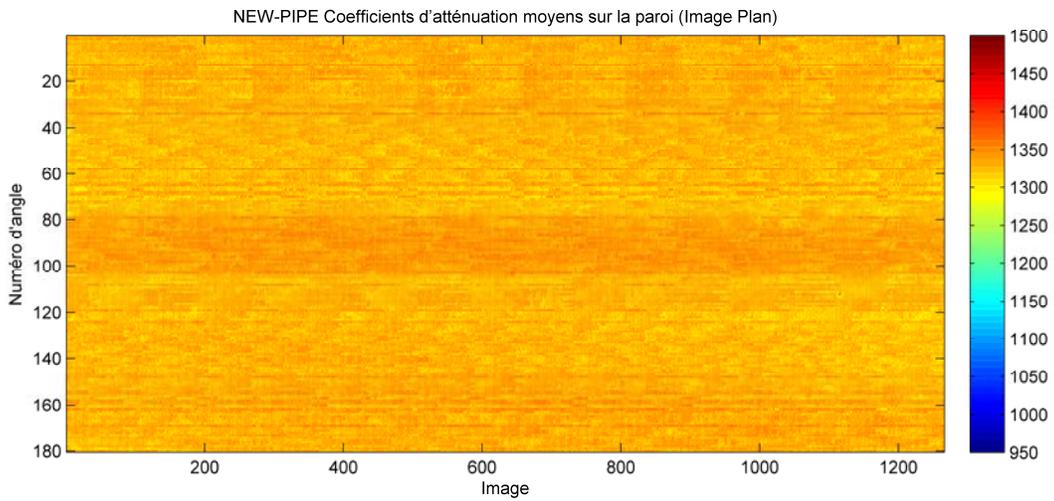


Figure 7 Exemple de l'Image-plan pour le tuyau neuf « NEW-PIPE »

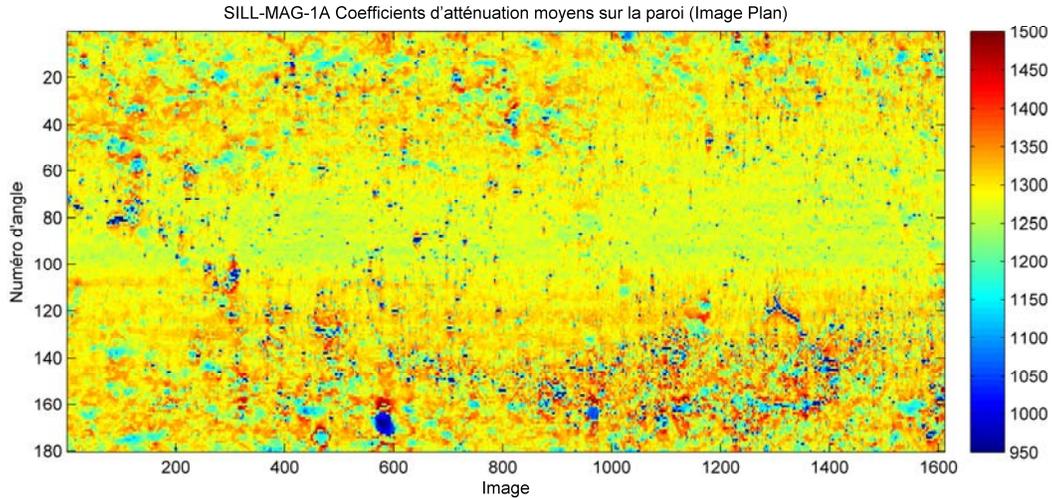


Figure 8 Exemple de l'Image-plan pour le tuyau corrodé « SILL-MAG-1A »

Deuxièmement, la moyenne mobile des valeurs de pixels de l'image-plan est calculée sur 100 mm et sur toute la longueur du tuyau. Il en résulte une matrice que nous avons appelée l'image-plan moyenne.

Dans un troisième lieu, afin de traduire ces valeurs moyennes de pixels en pourcentage de perte de matière, nous avons défini une valeur maximum de pixel (pv_{max}), correspondant à un matériau sain (zone saine), et une valeur minimum de pixel (pv_{min}) correspondant à l'air. Le pourcentage de perte de paroi est par la suite calculé pour chaque pixel de l'image-plan moyenne suivant l'équation :

$$\%perte = \left[1 - \left(\frac{pv - pv_{min}}{pv_{max} - pv_{min}} \right) \right] \times 100 \quad (4)$$

Cela conduit à une image similaire à l'image-plan moyenne, mais avec des pourcentages de perte de paroi comme valeurs de pixel au lieu de coefficients d'atténuation. Pour ce calcul, pv_{min} a été choisi comme la valeur du pixel de l'air au centre du tuyau (cette valeur varie de 968 à 987 pour tous les tuyaux analysés).

Pour sélectionner la valeur de pv_{max} , l'histogramme des valeurs de pixels a été tracé pour l'image-plan moyenne du tuyau et la valeur du pixel correspondant au pic de cet histogramme a été choisie comme pv_{max} . Cette valeur varie de 1 322 à 1 343 pour tous les tuyaux analysés. Enfin, pour compléter la première étape de la procédure, le pourcentage moyen de perte de

paroi, calculé précédemment pour des bandes continues de 100 mm, a été moyenné sur les 180 angles (360°), afin d'estimer la perte de matière sur des régions similaires à la zone de sensibilité de la sonde d'inspection. La Figure 9 montre les résultats obtenus pour le tuyau « NEW-PIPE ».

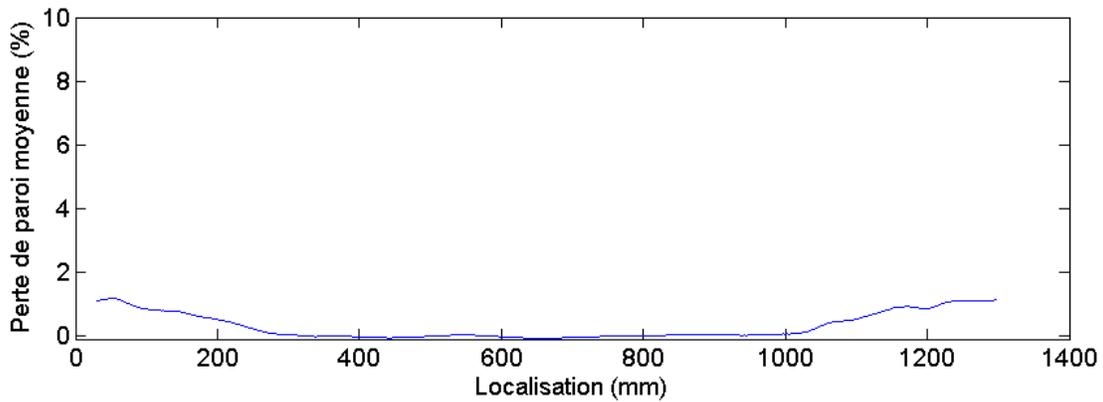


Figure 9 Pourcentage moyen de perte de paroi pour le tuyau neuf « NEW-PIPE »

La deuxième étape de la méthode de traitement d'image a été spécifiquement développée pour la validation de la technique d'inspection RF. Comme indiqué précédemment, les rapports d'inspection fournissent l'emplacement des défauts de corrosion détectés ainsi que le pourcentage de perte paroi et l'étendue spatiale de chaque défaut. L'information sur l'étendue spatiale d'un défaut spécifique est donnée en pourcentage de la zone de sensibilité affectée par la perte de matériau. Toutefois, en raison de la nature de cet outil, ce pourcentage n'est pas nécessairement continu, mais peut être distribué sur toute la zone de sensibilité. Par exemple, une perte de matériau de 25 % sur 50 % de la zone de sensibilité ne signifie pas qu'il existe une zone localisée couvrant 50 % de la zone de sensibilité (de 100 mm par 360°) qui est affectée par une perte d'épaisseur de 25 %, mais plutôt que cette perte de 25 % est répartie sur des zones totalisant 50 % de la zone de sensibilité (voir Figure 10).

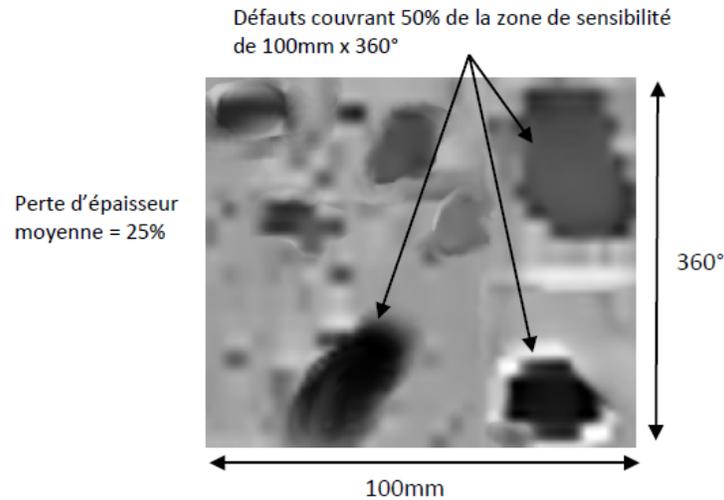


Figure 10 Illustration du principe utilisé par Aqua Diag pour l'estimation de la perte de paroi moyenne. La zone de sensibilité étant de 100 mm par 360°

Connaissant le principe suivi par Aqua Diag pour estimer la perte de paroi, la deuxième étape de la méthode consiste à classer par ordre décroissant, pour toutes les zones de sensibilité de 100 mm par 360° le long du tuyau, les pourcentages de perte de paroi calculés précédemment. Ensuite, nous avons calculé la perte de paroi moyenne des $Z\%$ pixels les plus corrodés de toutes ces zones de sensibilité. Plusieurs valeurs ont été données au pourcentage Z en fonction de l'analyse effectuée. Pour identifier les endroits où l'outil d'inspection n'a pas réussi à détecter les défauts couvrant au moins 13 % de la zone de sensibilité, des analyses ont été réalisées avec $Z = 13$. Les pertes d'épaisseur moyennes ont également été calculées pour les pourcentages (Z) pour lesquels des défauts ont été identifiés dans les rapports d'inspection fournis.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Validation préliminaire de l'analyse par tomodensitomètre

Les résultats présentés dans la section précédente pour le tuyau « NEW-PIPE » peuvent être considérés comme une première validation de la méthode d'analyse par tomodensitomètre décrite ci-dessus. En effet, on peut voir sur la Figure 9 que la perte d'épaisseur moyenne calculée pour le tuyau neuf varie de 0 à 1,1 %. Étant donné que ce tuyau n'a jamais été enterré, une perte de paroi proche de zéro était attendue. Des variations mineures jusqu'à 1,1 % peuvent être dues à une légère variation continue dans l'épaisseur de paroi le long du tuyau (qui a effectivement été observée en laboratoire), à de petites variations de la densité du matériau et/ou aux différentes hypothèses liées à la méthode de traitement d'images.

Nous remarquons également, à la Figure 7, que les valeurs moyennes de pixels semblent un peu plus élevées entre les numéros d'angle 80 et 100 qu'ailleurs dans l'image. Cette légère différence est due à la table sur laquelle le tuyau a été posé durant la numérisation et n'entraîne pas de modifications suffisamment significatives pour modifier les résultats, au niveau de précision requis pour valider l'outil d'inspection Aqua Diag.

Une deuxième validation a été effectuée avec le tuyau « Sill-MAG-1A ». Ce dernier n'a pas pu être inspecté par Aqua Diag à cause de son diamètre élevé de 200 mm. Cependant, le tuyau « Sill-MAG-1A » est très corrodé et constitue donc un test intéressant pour l'évaluation de la méthode développée pour l'analyse par tomodensitomètre. La Figure 11 montre une image agrandie d'une zone corrodée de ce tuyau avec une coupe transversale, fournie par le tomodensitomètre, passant par le trou vu sur la photo.

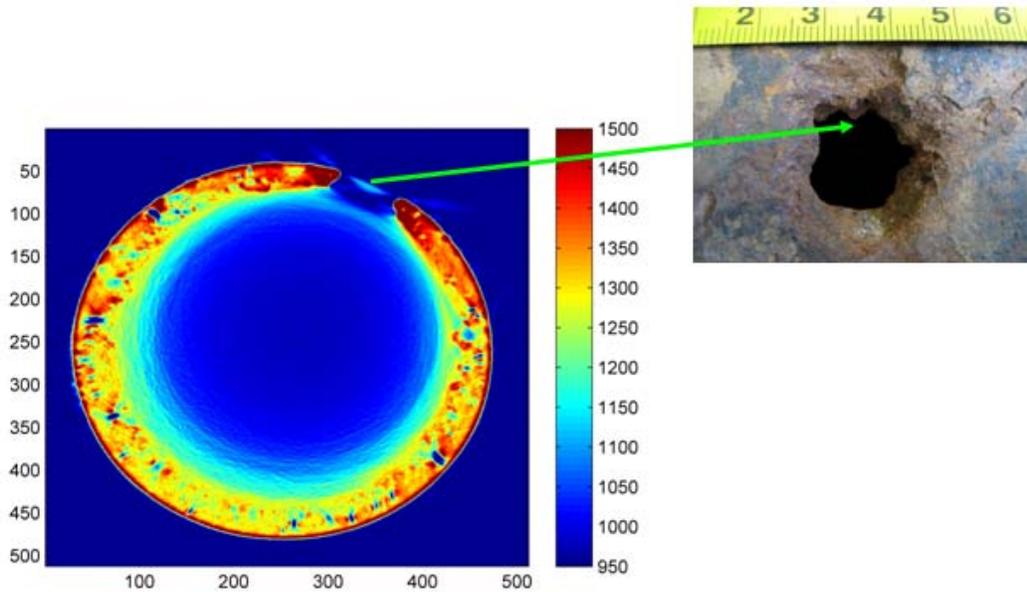


Figure 11 Coupe transversale fournie par le tomodensitomètre et photo agrandie de la zone corrodée du tuyau « SILL-MAG-1A »

Ce trou est facilement identifié sur la coupe transversale dans la zone où les valeurs des pixels correspondent aux valeurs de l'air (environ 980; zone en bleu). Sur le tuyau « Sill-MAG-1A », une perte de paroi de 99 % a été calculée avec l'analyse par tomodensitomètre pour une couverture de 2 % de la zone de sensibilité autour du trou. Ce résultat illustré, à la Figure 12, montre que la procédure mise au point a réussi à localiser un trou identifiable visuellement.

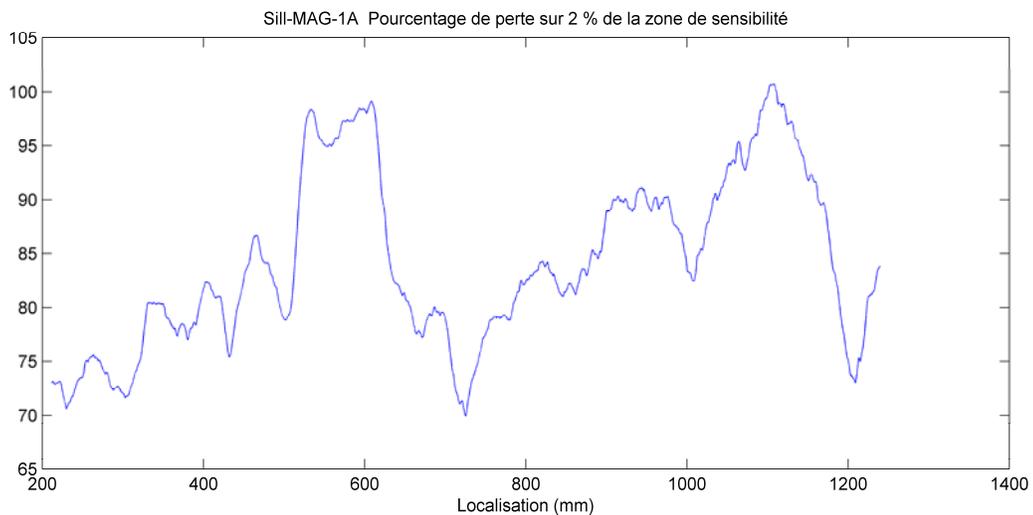


Figure 12 Pourcentage de perte de paroi couvrant 2 % de la zone de sensibilité (Tuyau « Sill-MAG-1A »)

3.2 Comparaison des résultats d'inspection par champ lointain sur le terrain et au laboratoire

Tel que mentionné précédemment, pour des raisons pratiques, l'inspection par champ lointain a été effectuée sur des conduites en laboratoire plutôt que sur le terrain (enfouies sous le sol). Le tuyau « LHSTCH-HOP », inspecté au laboratoire après excavation en 2009, avait déjà été inspecté en 2004, sous le sol et rempli d'eau. Lors de l'inspection sur le terrain, une perte de paroi de 18 % avait été identifiée par Aqua Diag à 1,2 m du point de référence. Les résultats de 2004 ont montré que ce défaut couvrait 7 % de la zone de sensibilité de la sonde. En 2009, lors de l'inspection en aveugle au laboratoire de l'INRS, une perte de paroi de 20 % a été identifiée par Aqua Diag à la position 1,4 m. Ce défaut couvrait moins de 13 % de la zone de sensibilité de la sonde. Cette vérification montre que la sonde a pu identifier le même défaut de corrosion en laboratoire et sur le terrain, avec une légère augmentation de sévérité entre 2004 et 2009. La différence de position ($\pm 0,2$ m) est due à des difficultés liées à la localisation précise des défauts avec l'outil, en raison principalement de la longueur de la sonde et des caractéristiques de traction du câble utilisé. D'un point de vue théorique, les résultats donnés par l'outil d'inspection ne sont pas sensés être différents que l'inspection soit réalisée *in situ* ou au laboratoire. Le succès du test de vérification présenté ci-dessus appuie cette affirmation, même si cela ne peut être pris comme une démonstration absolue.

3.3 Comparaison des résultats des deux techniques

Le Tableau 3 présente un résumé des résultats obtenus avec l'outil d'inspection par champ lointain (Aqua Diag) et l'analyse des images fournies par le tomodensitomètre. Dans ce tableau, tous les défauts de corrosion identifiés par Aqua Diag ont été notés. Pour ces défauts, le pourcentage de perte de paroi a été estimé avec l'analyse par tomodensitomètre pour le même pourcentage de couverture de la zone de sensibilité que celui déterminé par Aqua Diag. De plus, toutes les pertes de paroi qui n'ont pas été détectées par la sonde Aqua Diag, mais pour lesquelles une perte de 15 % ou plus a été identifiée par l'analyse d'images pour une couverture de 13 % de la zone de sensibilité sont également mentionnées dans le Tableau 3. Ceci vise à vérifier si la technique d'inspection utilisée par Aqua Diag a omis d'identifier certains défauts de corrosion sur les tuyaux analysés. Le seuil de 13 %, sélectionné pour l'identification des défauts avec l'analyse d'images, a été choisi en fonction de la performance attendue de l'outil d'inspection. En effet, des défauts de corrosion trop localisés ne peuvent être identifiés par cette technique d'inspection.

Les résultats détaillés sont présentés ci-dessous pour le tuyau « LHSTCH-MC ». Les résultats complets pour les autres tuyaux sont donnés en Annexe. La Figure 13 montre l'image-plan pour le tuyau « LHSTCH-MC ». On peut voir sur cette figure que les pertes d'épaisseur de paroi (taches bleues et vertes) sont concentrées entre les images 0 à 300 (de 0 à 210 mm) et entre les images 800 et 1200 (de 560 à 840 mm).

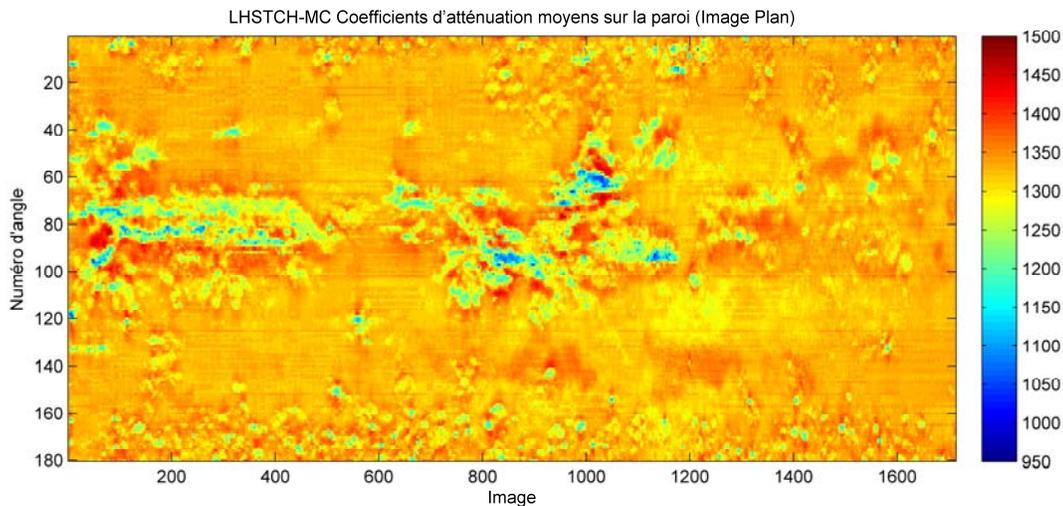


Figure 13 Image-plan du tuyau "LHSTCH-MC"

Pour le tuyau « LHSTCH-MC », l'outil d'inspection a identifié un seul défaut de corrosion à 0,7 m (voir Tableau 3), avec 38 % de perte d'épaisseur de paroi couvrant 24 % de la zone de sensibilité. Les pourcentages de perte de paroi ont donc d'abord été calculés avec l'analyse d'images pour ce même pourcentage de la zone de sensibilité (24 %). Les résultats de ce calcul sont présentés à la Figure 14b. Cette figure montre effectivement qu'il y a un pic de perte d'épaisseur à 0,7 m, selon l'analyse d'images, mais que ce pic serait d'environ 20 %. Ce résultat signifie que, pour la zone de 360° par 100 mm centrée sur la position 0,7 m, les 24 % de pixels représentant la pire perte de matériau totalisent une perte d'épaisseur moyenne de 20 %.

La Figure 14b montre un autre pic de perte d'épaisseur à 0,1 m. Même si ce défaut est repérable à une couverture de 24 % de la zone de sensibilité, nous avons aussi calculé les pertes d'épaisseur sur toute la longueur du tuyau couvrant 13 % de la zone de sensibilité. Tel que mentionné précédemment, le seuil de 13 % a été choisi comme standard pour tous les tuyaux analysés afin de vérifier si l'outil d'inspection avait omis d'identifier certaines pertes de matériau. La Figure 14a présente les résultats du tuyau « LHSTCH-MC » pour une couverture de 13 % de la zone de sensibilité. Les deux mêmes pics observés sur la Figure 14b apparaissent dans la Figure 14a (à 0,1 et 0,7 m), mais avec des pourcentages de perte d'épaisseur plus élevés. Ce résultat était prévisible, puisque le pourcentage de perte moyenne

est nécessairement plus élevé pour les 13 % de pixels les plus corrodés de la zone de sensibilité que pour les 24 % de pixels les plus affectés sur cette même zone.

En résumé, deux défauts ont été détectés par l'analyse des images du tomodensitomètre sur le tuyau « LHSTCH-MC ». Pour le premier défaut, situé à 0,1 m, la méthode d'analyse d'images a permis de calculer une perte d'épaisseur moyenne de 27 % et couvrant 13 % de la zone de sensibilité. Cette perte de matériel n'a pas été détectée par l'outil d'inspection RF. Ceci peut être dû à la position du défaut, qui est proche de l'extrémité du tuyau (la sonde mesurant 100 mm de long). Le deuxième défaut, situé à 0,7 m, a été identifié par les deux techniques d'analyse. L'outil d'inspection RF a estimé une perte de paroi de 38 % sur une couverture de 24 % de la zone de sensibilité à cet endroit, alors qu'une perte de 20 % a été calculée à partir de l'analyse par traitement des images du tomodensitomètre.

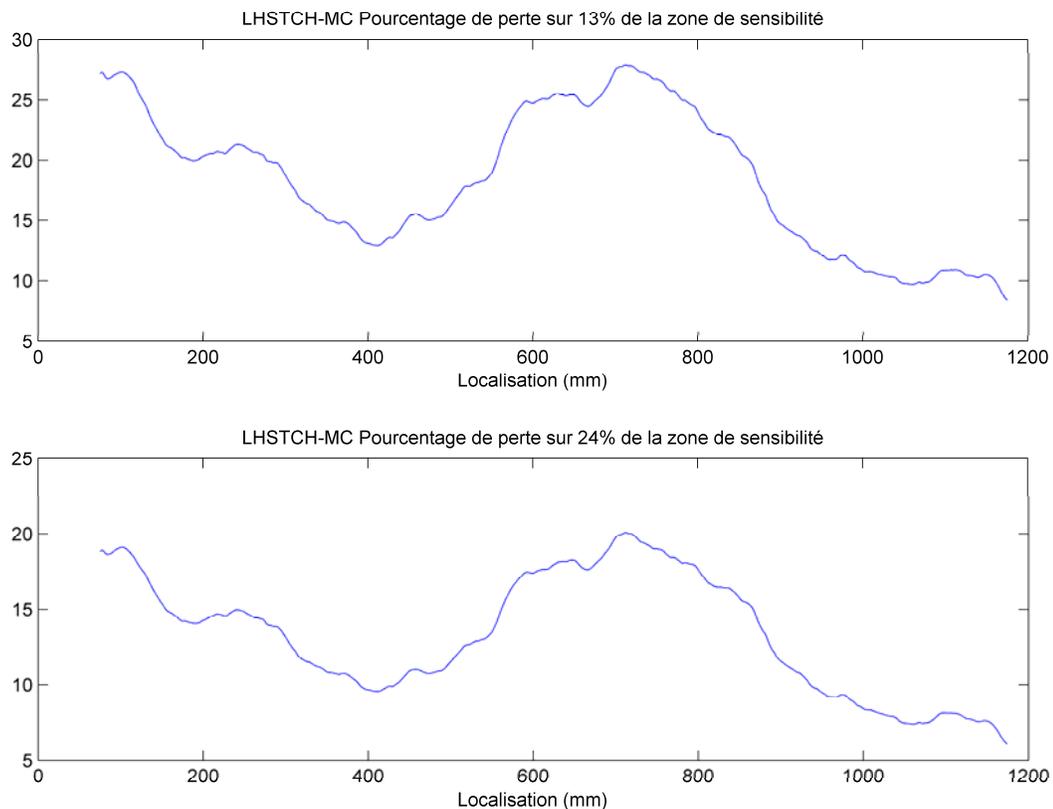


Figure 14 Pourcentage moyen de perte de paroi le long du tuyau « LHSTCH-MC » : a) pour 13 % de couverture de la zone de sensibilité; et b) pour 24 % de la zone de sensibilité

Des analyses similaires ont été menées sur les cinq autres tuyaux. Les résultats de ces analyses sont résumés au Tableau 3 et fournis à la fin de ce rapport sous forme de figures

annexées. De ce tableau, on constate que deux défauts ont été identifiés à partir des images du tomodensitomètre sur chaque tuyau, excepté pour le tuyau « B-MAN-2B », pour lequel trois défauts ont été identifiés. L'outil d'inspection a omis d'identifier un défaut par tuyau, à l'exception du tuyau « B-MAN-1B » pour lequel tous les défauts ont été détectés. Certains défauts non identifiés sont situés près de l'extrémité des tuyaux tandis que d'autres ne sont probablement pas assez gros (étendus) pour être identifiés par l'outil. Toutefois, la non-détection du défaut #1 sur le tuyau « B-MAN-2A » (34 % de perte d'épaisseur de paroi sur 13 % de la zone de sensibilité) ne peut être expliquée. Pour les huit défauts qui ont été détectés par les deux techniques, la différence entre les pourcentages de perte estimés avec l'outil d'inspection et avec l'analyse des images varie de -22 % (défaut #3 sur le tuyau « B-MAN-2B ») à 18 % (défaut #2 sur le tuyau « LHSTCH-MC »), avec une surestimation moyenne de 3 % par l'outil d'inspection RF. Ces résultats montrent que cet outil a la plupart du temps été en mesure d'identifier les pertes d'épaisseur de paroi lorsque le volume des défauts dépassait un certain seuil. Ceci est en accord avec les attentes, car cet outil n'est pas conçu pour identifier les piqûres de corrosion localisées, mais plutôt pour repérer les zones où l'étendue des pertes matérielles peut altérer l'intégrité structurale d'une conduite.

Il est également important de constater que, malgré les hypothèses liées à la fois à la technique d'inspection et à la procédure d'analyse des images, les deux méthodes ont pu déceler les défauts à des endroits similaires, et souvent exactement à la même position (pour une précision de 0,1 m). Enfin, la comparaison des résultats des deux techniques montre que l'inspection des conduites avec l'outil d'inspection par champ lointain fournit des données précieuses pour l'estimation de l'état structural global des conduites métalliques.

Tableau 3 Récapitulatif des résultats de comparaison

Tuyau	Défaut	Analyse par tomodensitomètre			Inspection par Aqua Diag		
		Position (m)	Perte de paroi (%)	Couverture de la zone de sensibilité (%)	Position (m)	Perte de paroi (%)	Couverture de la zone de sensibilité (%)
B-MAN-1A	#1	0,7	18	13	n.i.	n.i.	n.i.
	#2	1,3	22	22	1,2	22	22
B-MAN-1B	#1	0,7 – 0,9	16	13	0,8	17	13
	#2	1,6	15	17	1,6	28	17
B-MAN-2A	#1	0,8	34	13	n.i.	n.i.	n.i.
	#2	1,2 – 1,5	14	63	1,8	15	63
B-MAN-2B	#1	0,4	20	13	0,4	23	< 13
	#2	1	25	13	n.i.	n.i.	n.i.
	#3	1,4	48	13	1,3	26	13
LHSTCH-MC	#1	0,1	27	13	n.i.	n.i.	n.i.
	#2	0,7	20	24	0,7	38	24
LHSTCH-HOP	#1	0,2	17	13	n.i.	n.i.	n.i.
	#2	1,4	12	13	1,4	20	< 13

n.i.: non identifié

4. CONCLUSION

La capacité d'un outil d'inspection par champ lointain disponible dans l'Est du Canada pour l'auscultation des conduites d'eau potable *in situ* a été évaluée. La localisation et les caractéristiques des défauts identifiés avec cet outil sur six différents tuyaux ont été comparées à celles estimées par l'analyse des images fournies par un tomodensitomètre pour ces mêmes tuyaux. Une méthode originale a été proposée pour l'analyse des images du tomodensitomètre, à partir de laquelle les pertes d'épaisseur de paroi ont été estimées suivant le principe de base stipulant que le coefficient d'atténuation des rayons X dans un matériau homogène est une fonction linéaire de sa densité. Les résultats présentés dans ce document montrent que l'outil d'inspection par champ lointain utilisé par la compagnie Aqua Diag a été capable de localiser la plupart des défauts identifiés par l'analyse des images. Ces résultats révèlent que la sonde testée est un outil approprié et utile pour l'inspection des conduites d'eau en fonte, car il fournit des informations fiables sur les principaux défauts de corrosion et donc sur l'état général de la structure des tuyaux inspectés. Cependant, les petites piqûres de corrosion ne peuvent être identifiées par cette sonde, même si ces défauts peuvent provoquer des fuites et même parfois initier des zones étendues de corrosion sur les conduites touchées.

Une validation supplémentaire de la sonde par champ lointain testée pourrait être effectuée sur des tuyaux supplémentaires et, si possible, en réalisant des inspections sous le sol. Enfin, il est essentiel de noter que les informations fournies par les inspections RF peuvent être utiles non seulement pour caractériser l'état actuel de la tuyauterie inspectée, mais aussi pour l'élaboration de modèles de corrosion. Ces modèles, dédiés à la prédiction de l'évolution de la corrosion dans le temps en fonction des attributs des conduites et des caractéristiques environnementales, peuvent être utiles pour une planification réfléchie du renouvellement des conduites d'eau en fonte.

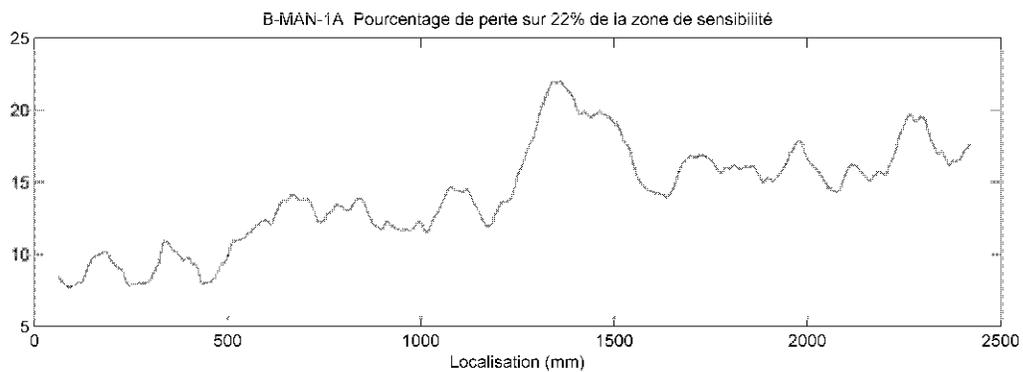
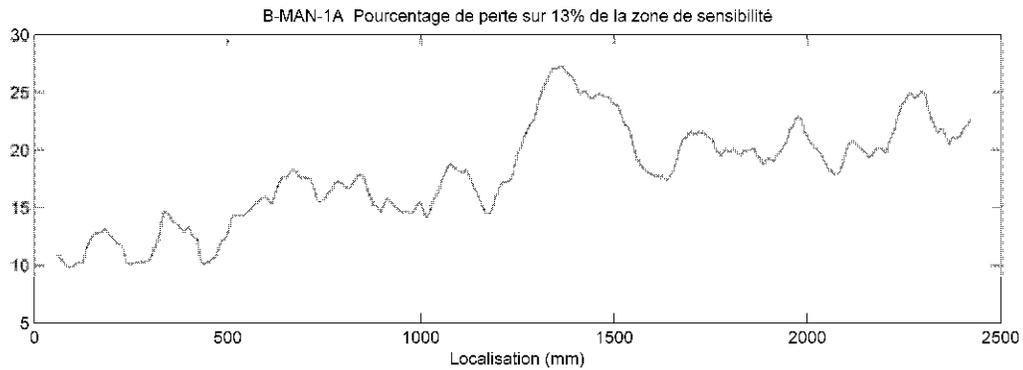
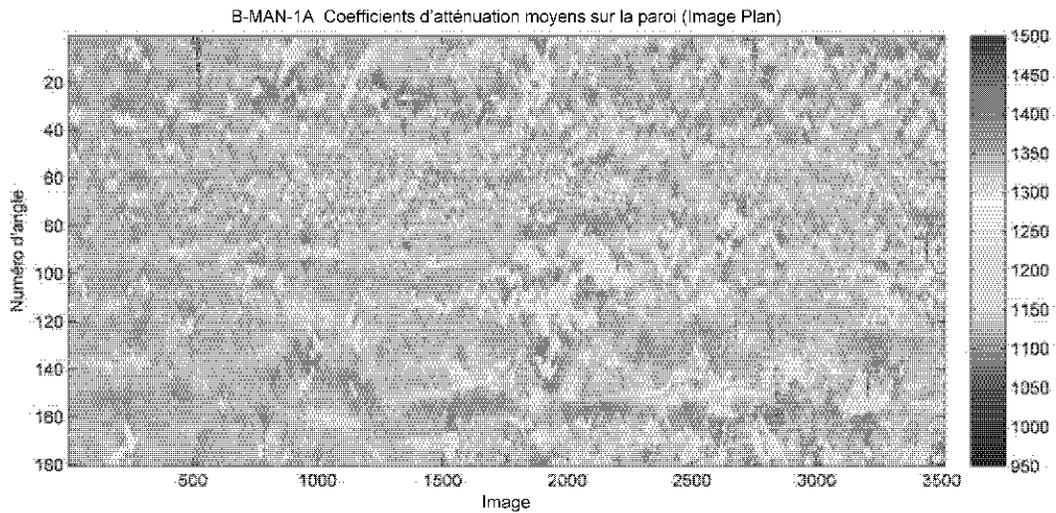
5. REMERCIEMENTS

Les auteurs sont reconnaissants à la Ville de Québec pour avoir fourni les tuyaux analysés, et plus particulièrement à Marjorie Ramirez-Ortega, qui a réussi à recueillir les tuyaux et à les amener au laboratoire. La collaboration de Marc Grenier de l'Université Laval, qui a conçu la sonde RF et analysé les résultats des essais d'inspection en laboratoire, et de Jacques Pineault d'Aqua Diag, qui a réalisé les inspections, est également reconnue. Les auteurs sont également reconnaissants à Bernard Long et à Francis Moore de l'INRS pour leur précieuse aide lors de l'interprétation des images du tomodensitomètre.

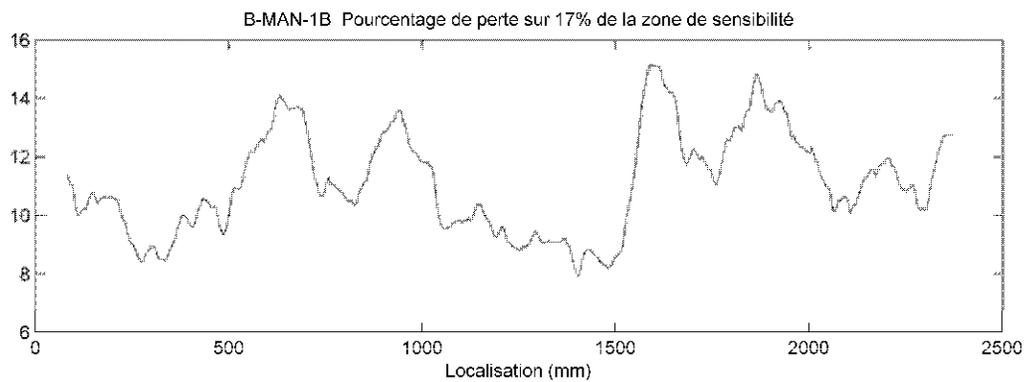
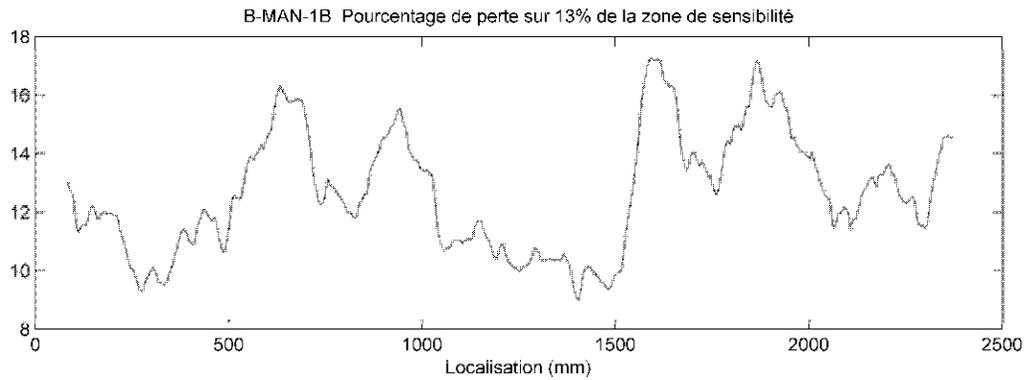
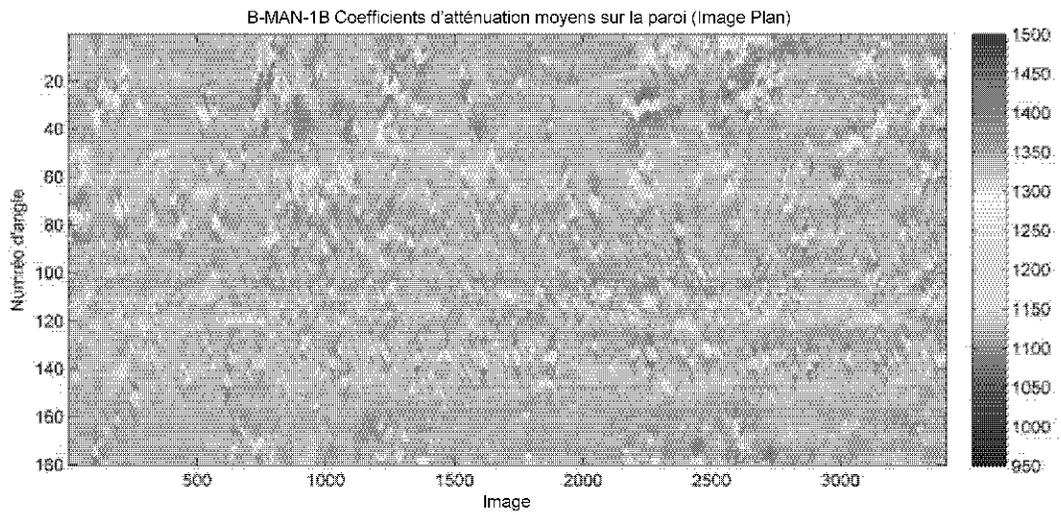
6. ANNEXE

Résultats additionnels pour les cinq autres tuyaux analysés :

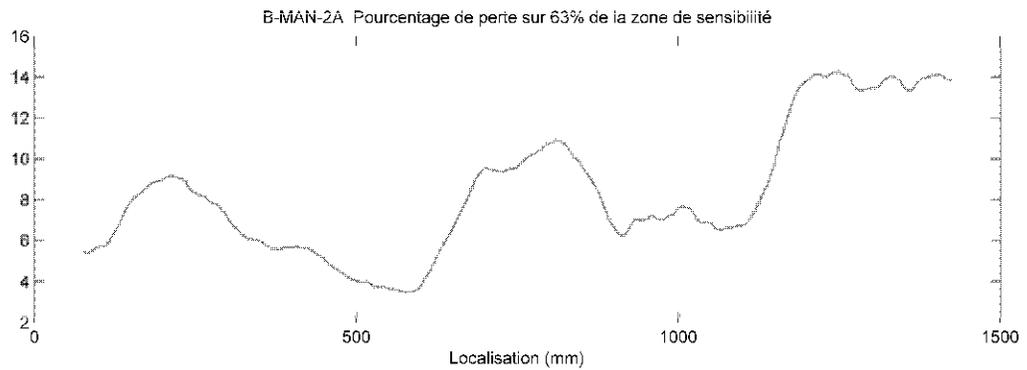
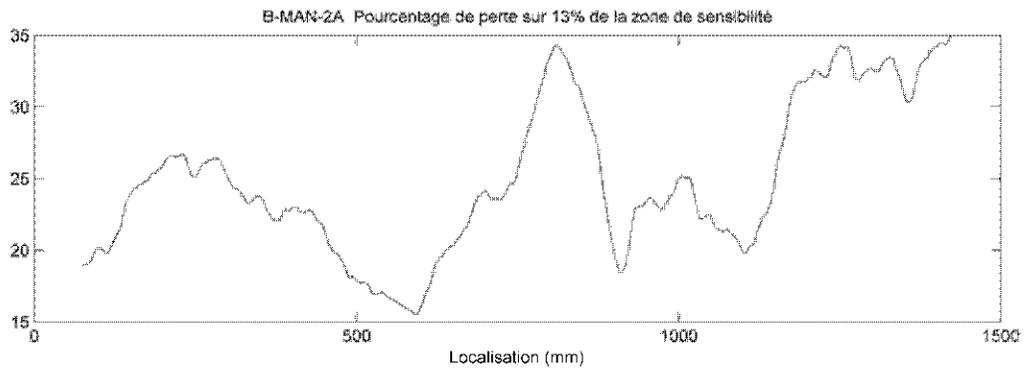
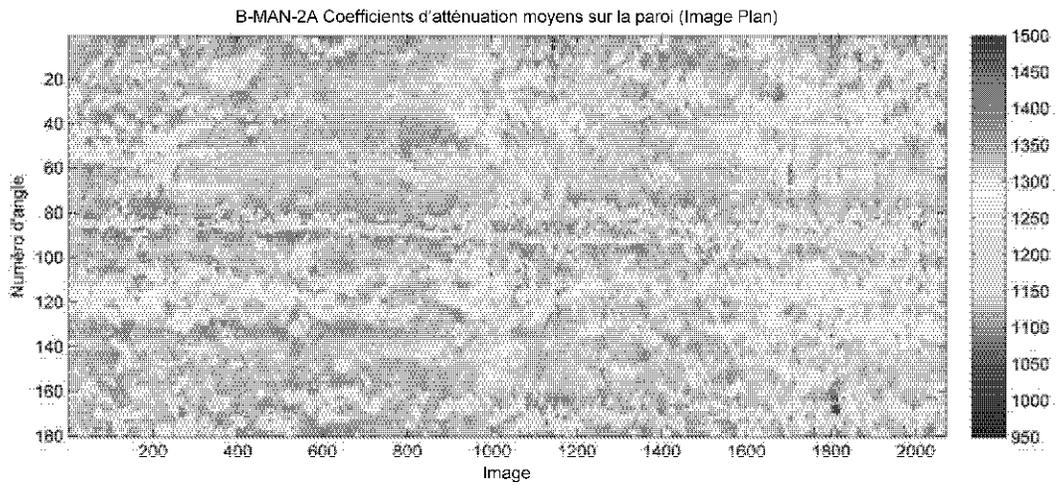
a) Tuyau « B-MAN-1A »



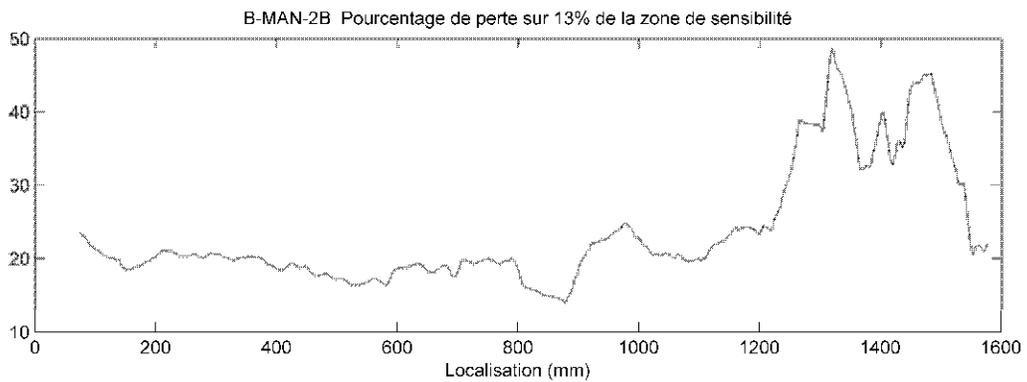
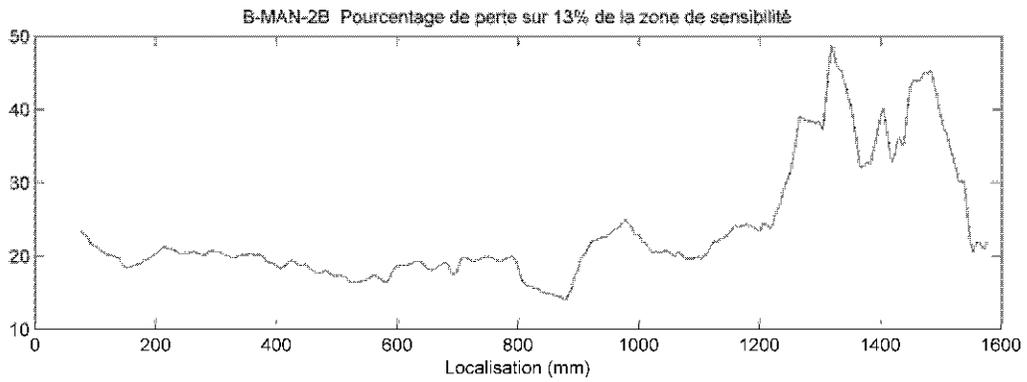
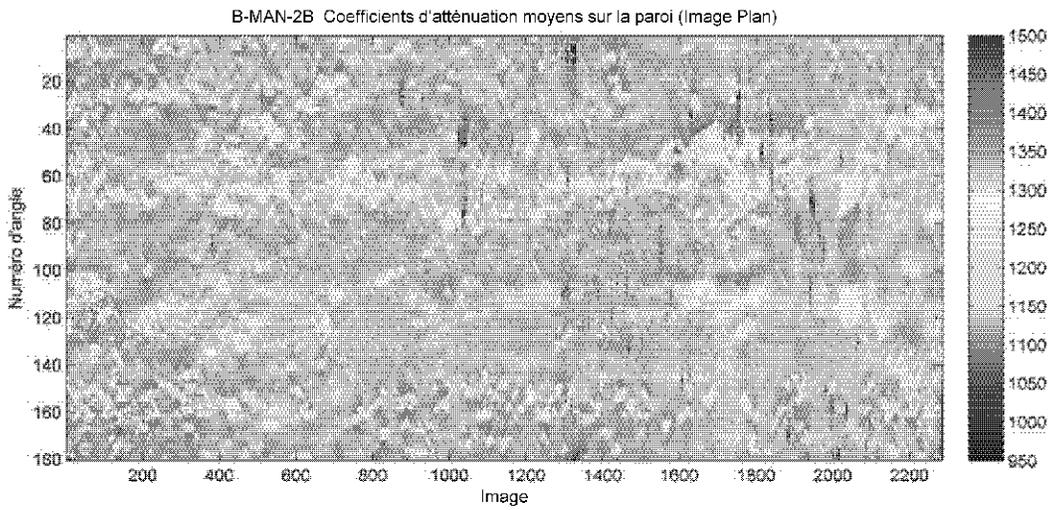
b) Tuyau « B-MAN-1B »



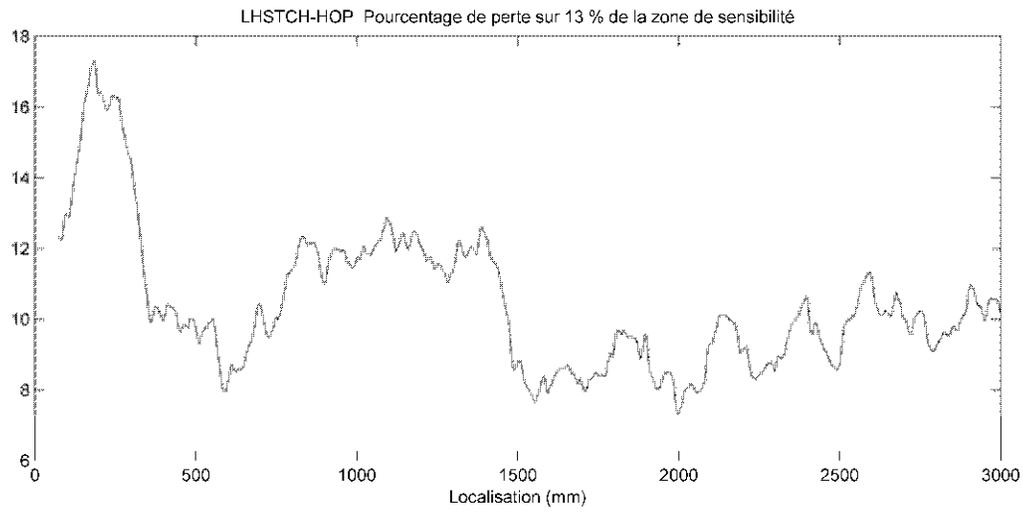
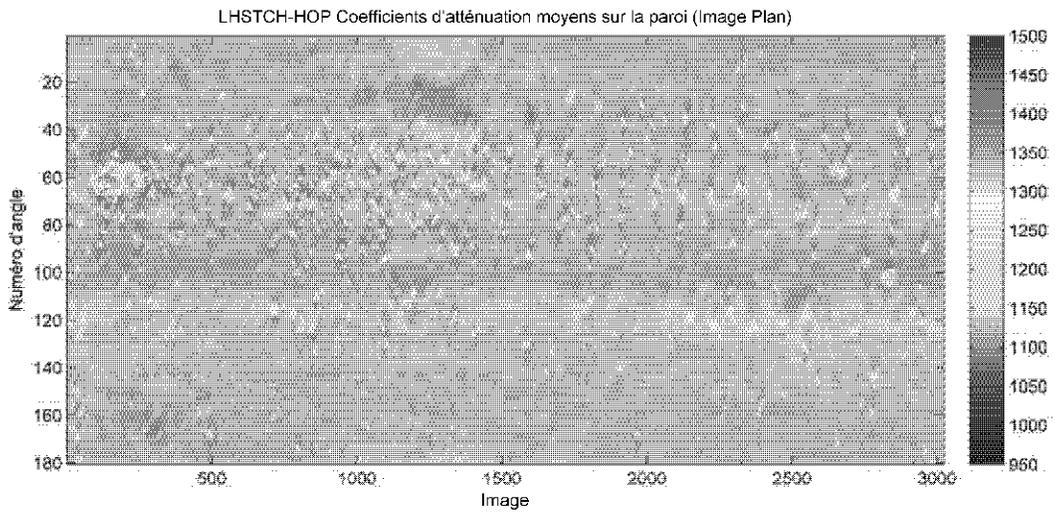
c) Tuyau « B-MAN-2A »



d) Tuyau « B-MAN-2B »



e) Tuyau « LHSTCH-HOP »



7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agbenowosi, N.K. (2000). *A Mechanistic Analysis Based Decision Support System for Scheduling Optimal Replacement*. Ph.D. thesis, Virginia Polytechnic Institute. Disponible en ligne: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11302000-3612/unrestricted/dissert1.pdf>.
- AWWA (2001). *Dawn of the Replacement Era - Reinvesting in Drinking Water Infrastructure*. American Water Works Association, Denver, CO.
- Beutel, J., Kundel, H.L. et Van Metter, R. L. (2000). *Handbook of Medical Imaging. Volume 1: Physics and Psychophysics*. SPIE – The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA.
- Brown, D.J. et Le, Q.V. (1989). Application of the remote field eddy current technique to the in-service inspection of ferromagnetic heat exchanger tubing. *Materials Evaluation*, 47(1): 47-55.
- Burn, S., Marlow, D., Moglia, M. et Bucland, P. (2007). Asset management for water infrastructure. *Water Asset Management International*, 3(2): 12-18.
- Dingus, M., Haven, J. et Austin, R. (2002). *Nondestructive, Noninvasive Assessment of Underground Pipelines*. AWWA Research Foundation and American Water Works Association.
- Dridi, L., Mailhot, A., Parizeau, M. et Villeneuve, J.-P. (2009). Multiobjective approach for pipe replacement based on Bayesian inference of break model parameters. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(5): 344-354. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2009)135:5(344).
- Ferguson, P., Heathcote, M., Moore, G. et Russell, D. (1996). Condition assessment of water mains using remote field technology. *Water*, March/April.
- Fuchs, H.V. et Riehle, R. (1991). Ten years of experience with leak detection by acoustic signal analysis. *Applied Acoustics*, 33: 1-9.

- Gerstenmayer, J.L. et Thiery, C. (2002). *Tomographie à Rayons X. Référence P950, Ed. Techniques de l'Ingénieur*. <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/p950/tomographie-a-rayons-x.html#permissions>, dernière consultation 17 avril 2010.
- Giustolisi, O. et Berardi, L. (2009). Prioritizing pipe replacement: from multiobjective genetic algorithms to operational decision support. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6): 484-492.
- Grenier, M. (2009). Communication personnelle.
- Hangartner, T.N. et Overton, T.R. (1982). Quantitative measurement of bone density using gamma-ray computed tomography. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 6(6): 1156-1162.
- Herman, G.T. (1979). Correction for beam hardening in computed tomography. *Physics in Medicine and Biology*, 24(1): 81-106.
- Hopkins, F., Du, Y., Lasiuk, B., Abraham, A. et Basu, S. (2004). Analytical corrections for beam-hardening and object scatter in volumetric computed tomography systems. Dans : *Proceedings of the 16th World Conference on Nondestructive Testing (WCNT) 2004*. August 30 - September 3, Montreal, Canada. Disponible sur : http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/radiography/462_hopkins.pdf.
- Kak, A.C. et Slaney, M. (1988). *Principles of Computerized Tomography Imaging*. IEEE Press, New-York, NY.
- Kirmeyer, G.J., Richards, W. et Smith, C.D. (1994). *An Assessment of Water Distribution Systems and Associated Research Needs*. AWWA Research Foundation, Denver, CO.
- Kleiner, Y. et Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains: statistical models. *Urban Water*, 3(3): 131-150.
- Kleiner, Y. et Rajani, B. (2010). I-WARP: individual water main renewal planner. *Drinking Water Engineering and Science Discussions*, 3(1): 25-41.

- Koutsakos, E., Woodward, T. et Russell, D.E. (1997). Using a non-destructive technique for evaluating water mains conditions. Dans : *3rd International Conference on Water Pipeline Systems - Leakage Management, Network Optimization, and Pipeline Rehabilitation Technology*, The Hague, Netherlands, 13-15 mai 1997. Ed. R. Chilton, BHR Group Conference Series Publication Issue 23, p. 93-105.
- Lindgren, L.O. (1991). Medical CAT-scanning: X-ray absorption coefficients, CT-numbers and their relation to wood density. *Wood Science and Technology*, 25(5): 341-349.
- McDonald, S. et Makar, J. (1996). *Assessment of the Hydroscope 201TM Condition Index Evaluation of Gray Cast Iron Pipe from Gatineau, Quebec*. NRC Report A-7015.3, National Research Council, Ottawa, Canada.
- Makar, J.M. et Chagnon, N. (1999). Inspection systems for leaks, pits, and corrosion. *Journal of the American Water Works Association*, 91(7): 36-46.
- Mailhot, A., Poulin, A. et Villeneuve, J.-P. (2003). Optimal replacement of water pipes. *Water Resources Research*, 39(5): 1136. doi:10.1029/2002WR001904.
- Pelletier, G. (2000). *Impact du remplacement des conduites d'aqueduc sur le nombre annuel de bris*. Thèse de doctorat, INRS, Quebec, Canada.
- Rajani, B. (2000). *Investigation of Grey Cast Iron Water Mains to Develop a Methodology for Estimating Service Life*. AWWA Research Foundation. Published by American Water Works Association.
- Robinson, D. (1998). Identification and sizing of defects in metallic pipes by remote field eddy current inspection. *Trenchless Technology Research*, 13(1-2): 17-27.
- Schmidt, T.R. (1984). The remote field eddy current inspection technique. *Materials Evaluation*, 42(2): 225-230.
- Schmidt, T.R. et Atherton, D.L. (2002). *Introduction to Remote Field Log Interpretation*. <http://www.physics.queensu.ca/~amg/rfliintr.html>, dernière consultation 11 mars 2010.

Shamir, U. et Howard, C.D.D. (1979). An analytic approach to scheduling pipe replacement. *Journal of American Water Works Association*, 71: 248–58.

Skabo, R.R. et Jackson, R.Z. (1991). *Nondestructive Testing of Water Mains for Physical Integrity*. Prepared for the American Water Works Association Research Foundation, A Technology Transfer Conference, August 27, Research Triangle Park, NC.

Staples, L.B. (1996). A new tool for condition evaluation of cast and ductile iron pipe. Dans : *Corrosion 96 - The NACE International Annual Conference and Exposition*, Denver, CO, Paper No. 45.

Zhou, R.-F., Wang, J. et Chen, W.-M. (2009). X-ray beam hardening correction for measuring density in linear accelerator industrial computed tomography. *Chinese Physics C*, 33(7): 599-602.