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
LISTE DES TABLEAUX
2. METHODOLOGIE
2.1 Tuyaux analyses
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
2.3 L'analyse par tomodensitomètre (<i>CT Scan</i>)8
2.3.1 Atténuation des rayons X par la matière10
3. RÉSULTATS ET DISCUSSION
3.1 Validation préliminaire de l'analyse par tomodensitomètre
3.2 Comparaison des résultats d'inspection par champ lointain sur le terrain et au
laboratoire
3.3 Comparaison des résultats des deux techniques
4. CONCLUSION
5. REMERCIEMENTS
6. ANNEXE
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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 artéfacts	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	05
sensidilite	

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 Agua 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 Agua 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

1

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 Filed*) 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.

2

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 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 tomodensitométrie (*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						
	Date d'installation	Âge estimé à	Diamètre	Longueur	Épaisseur	
Nom	estimée	l'inspection			moyenne de paroi	
	(ans)	(ans)	(mm)	(m)	(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,		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.

7

Le pourcentage de perte de paroi du tuyau ainsi que son étendue circonférentielle 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 circonférentielle 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 = $1,60218 \times 10^{-19}$ 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) :

$$N = N_0 e^{-\mu x} \tag{1}$$

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) :

$$HU = \frac{\mu - \mu_{water}}{\mu_{water}} \times 1000$$
(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 :

$$valeur_pixel = \frac{HU + 10240}{10}$$
(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 :

- 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;
- 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 :

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

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 :

$$\Delta p v = B \exp(-Cx) \tag{A.2}$$

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 :

$$\rho v_{corr} = \rho v - \Delta \rho v \tag{A.3}$$

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 :

$$\% perte = \left[1 - \left(\frac{\rho v - \rho v_{\min}}{\rho v_{\max} - \rho v_{\min}} \right) \right] \times 100$$
(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 (± 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 concu pour identifier les piqures 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.

		Analyse par tomodensitomètre			In	qua Diag	
Tuyau	Défaut	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

Tableau 3 Récapitulatif des résultats de comparaison

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 identifiés 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 »



B-MAN-2A Pourcentage de perte sur 13% de la zone de sensibilité 15 L Localisation (mm) B-MAN-2A Pourcentage de perte sur 63% de la zone de sensibilité

Localisation (mm)

d) Tuyau « B-MAN-2B »





Localisation (mm)

36

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 inservice 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*. <u>http://www.techniques-ingenieur.fr/book/p950/tomographie-a-rayons-x.html#permissions</u>, 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 beamhardening 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.

<u>mtp.//www.ndt.nebarticle/wondt2004/pa/radiography/402_hopkins.pdf</u>.

- 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-scaning: 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*. <u>http://www.physics.queensu.ca/~amg/rfliintr.html</u>, 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.