

Eau potable



Détérioration et inspection des réseaux de distribution d'eau

Le présent document est le premier de la série des règles de l'art en matière de distribution de l'eau potable à la population. Pour connaître les titres des autres règles de l'art de cette série ou d'autres séries, prière de visiter www.infraguide.ca.

Guide national pour
des infrastructures
municipales durables



NRC · CNRC



Fédération
canadienne des
municipalités

Canada

Détérioration et inspection des réseaux de distribution d'eau

Version no 1.0

Date de publication : Septembre 2002

© 2002 Fédération canadienne des municipalités et le Conseil national de recherches du Canada

ISBN 1-897094-15-9

Le contenu de la présente publication est diffusé de bonne foi et constitue une ligne directrice générale portant uniquement sur les sujets abordés ici. L'éditeur, les auteur(e)s et les organisations dont ceux-ci relèvent ne font aucune représentation et n'avancent aucune garantie, explicite ou implicite, quant à l'exhaustivité ou à l'exactitude du contenu de cet ouvrage. Cette information est fournie à la condition que les personnes qui la consultent tirent leurs propres conclusions sur la mesure dans laquelle elle convient à leurs fins; de plus, il est entendu que l'information ci-présentée ne peut aucunement remplacer les conseils ou services techniques ou professionnels d'un(e) spécialiste dans le domaine. En aucune circonstance l'éditeur et les auteur(e)s, ainsi que les organisations dont ils relèvent, ne sauraient être tenus responsables de dommages de quelque sorte résultant de l'utilisation ou de l'application du contenu de la présente publication.

INTRODUCTION

InfraGuide – Innovations et règles de l'art

Pourquoi le Canada a besoin d'InfraGuide

Les municipalités canadiennes dépensent de 12 à 15 milliards de dollars chaque année dans le domaine des infrastructures, mais cela semble ne jamais suffire. Les infrastructures actuelles sont vieillissantes et la demande pour un plus grand nombre de routes de meilleure qualité, et pour de meilleurs réseaux d'eau et d'égout continue d'augmenter, en réaction à la fois aux normes plus rigoureuses en matière de sécurité, de santé et de protection de

l'environnement, et à la croissance de la population. La solution consiste à modifier la façon dont nous planifions, concevons et gérons les infrastructures. Ce n'est qu'en agissant ainsi que les municipalités pourront satisfaire les nouvelles demandes dans un cadre responsable sur le plan fiscal et durable sur le plan de l'environnement, tout en préservant la qualité de vie.

C'est ce que le Guide national pour des infrastructures municipales durables : Innovations et règles de l'art (InfraGuide) cherche à accomplir.

En 2001, par l'entremise du programme Infrastructures Canada (IC) et du Conseil national de recherches Canada (CNRC), le gouvernement fédéral a uni ses efforts à ceux de la Fédération canadienne des municipalités (FCM) pour créer le Guide national pour des infrastructures municipales durables (InfraGuide). InfraGuide est à la fois un nouveau réseau national de personnes et une collection de plus en plus importante de règles de l'art publiées à l'intention des décideurs et du personnel technique œuvrant dans les secteurs public et privé. En s'appuyant sur l'expérience et la recherche canadiennes, les rapports font état des règles de l'art qui contribuent à la prise de décisions et de mesures assurant la durabilité des infrastructures municipales dans six domaines clés : la voirie municipale, l'eau potable, les eaux pluviales et les eaux usées, la prise de décisions et

la planification des investissements, les protocoles environnementaux et le transport en commun.

On peut se procurer une version électronique en ligne ou un exemplaire sur papier des règles de l'art.

Un réseau d'excellence de connaissances

La création d'InfraGuide est rendue possible grâce à une somme de 12,5 millions de dollars

d'Infrastructures Canada, des contributions de produits et de services de diverses parties prenantes de l'industrie, de ressources techniques, de l'effort

commun des praticiens municipaux, de chercheurs et d'autres experts, et d'une foule de bénévoles du pays tout entier. En regroupant et en combinant les meilleures expériences et les meilleures connaissances des Canadiens, InfraGuide aide les municipalités à obtenir le rendement maximal de chaque dollar investi dans les infrastructures — tout en étant attentives aux répercussions sociales et environnementales de leurs décisions.

Des comités techniques et des groupes de travail formés de bénévoles — avec l'aide de sociétés d'experts-conseils et d'autres parties prenantes — sont chargés des travaux de recherche et de la publication des règles de l'art. Il s'agit d'un système de partage des connaissances, de la responsabilité et des avantages. Nous vous incitons à faire partie du réseau d'excellence d'InfraGuide. Que vous soyez un exploitant de station municipale, un planificateur ou un conseiller municipal, votre contribution est essentielle à la qualité de nos travaux.

Joignez-vous à nous

Communiquez avec InfraGuide sans frais, au numéro **1 866 330-3350**, ou visitez notre site Web, à l'adresse **www.infraguide.ca**, pour trouver de plus amples renseignements. Nous attendons avec impatience le plaisir de travailler avec vous.

Introduction

InfraGuide – Innovations
et règles de l'art

Les grands thèmes des règles de l'art d'InfraGuide



Eau potable

Le dicton « Loin des yeux, loin du cœur » s'applique bien aux réseaux de distribution d'eau qui ont été négligés dans de nombreuses municipalités. La règle de l'art en matière d'eau potable propose divers moyens d'améliorer les capacités des municipalités ou des services publics de gérer la distribution d'eau potable de façon à assurer la santé et la sécurité publique de manière durable tout en offrant le meilleur rapport qualité-prix. Les pratiques et techniques de pointe liées aux enjeux prioritaires clés éclaireront les municipalités et les services publics dans les domaines de la prise de décision et des meilleures techniques opérationnelles et d'ingénierie. Des questions telles que la reddition de compte dans le domaine de l'eau, la réduction des pertes en eau et la consommation d'eau, la détérioration et l'inspection des réseaux de distribution, la planification du renouveau, les technologies de remise en état des réseaux d'eau potable et la qualité de l'eau dans les réseaux de distribution y sont abordées.



Prise de décisions et planification des investissements

Les représentants élus et les échelons supérieurs de l'administration municipale ont besoin d'un cadre qui leur permet de faire connaître la valeur de la planification et de l'entretien des infrastructures tout en trouvant un équilibre entre les facteurs sociaux, environnementaux et économiques. La règle de l'art en matière de prise de décision et de planification des investissements convertit des notions complexes et techniques en principes non techniques et recommandations pour la prise de décision, et facilite l'obtention d'un financement soutenu adéquate pendant le cycle de vie de l'infrastructure. Elle aborde, entre autres, les protocoles servant à cerner les coûts-avantages associés aux niveaux de service désirés, les analyses comparatives stratégiques et les indicateurs ou points de référence dans le domaine de la politique d'investissement et des décisions stratégiques.



Protocoles environnementaux

Les protocoles environnementaux se concentrent sur le rapport qu'exercent entre eux les systèmes naturels et leurs effets sur la qualité de vie humaine, en ce qui a trait à la livraison des infrastructures municipales. Les systèmes et éléments environnementaux comprennent la terre (y compris la flore), l'eau, l'air (dont le bruit et la lumière) et les sols. Parmi la gamme de questions abordées, mentionnons : la façon d'intégrer les considérations environnementales dans l'établissement des niveaux de service désirés pour les infrastructures municipales et la définition des conditions environnementales locales, des défis qui se posent et des perspectives offertes au niveau des infrastructures municipales.



Eaux pluviales et eaux usées

Le vieillissement des infrastructures souterraines, l'appauvrissement des ressources financières, les lois plus rigoureuses visant les effluents, la sensibilisation accrue de la population aux incidences environnementales associées aux eaux usées et aux eaux pluviales contaminées sont tous des défis auxquels les municipalités sont confrontées. La règle de l'art en matière des eaux pluviales et des eaux usées traite des infrastructures linéaires enfouies, du traitement en aval et des questions liées à la gestion. Elle aborde, entre autres, les moyens de : contrôler et réduire l'écoulement et l'infiltration; obtenir des ensembles de données pertinentes et uniformes; inspecter les systèmes de collecte et en évaluer l'état et la performance, en plus de traiter de l'optimisation de l'usine de traitement et de la gestion des biosolides.



Transport en commun

L'urbanisation impose des contraintes sur des infrastructures vieillissantes en voie de dégradation et suscite des préoccupations face à la détérioration de la qualité de l'air et de l'eau. Les réseaux de transport en commun contribuent à réduire les embouteillages et à améliorer la sécurité routière. La règle de l'art en matière du transport en commun fait ressortir la nécessité d'améliorer l'offre, d'influencer la demande et de procéder à des améliorations opérationnelles ayant des incidences minimales sur l'environnement, tout en répondant aux besoins sociaux et commerciaux.



Chaussées et trottoirs

La gestion rentable des chaussées municipales passe par une judicieuse prise de décision et un entretien préventif. La règle de l'art en matière de routes et trottoirs municipaux porte sur deux volets prioritaires : la planification préliminaire et la prise de décision visant à recenser et gérer les chaussées en tant que composantes du système d'infrastructures, et une approche de prévention pour retarder la détérioration des chaussées existantes. Au nombre des sujets traités, mentionnons l'entretien préventif, en temps opportun, des voies municipales; la construction et la remise en état des boîtiers des installations, et l'amélioration progressive des techniques de réparation des chaussées en asphalte et en béton.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	iii
Remerciements	vii
Résumé	ix
1. Généralités	1
1.1 Introduction	1
1.2 Portée.....	1
1.3 Questions de nature générale concernant la santé et la sécurité	1
1.4 Durabilité.....	1
1.5 Glossaire	2
2. Justification	5
2.1 Détérioration des réseaux de distribution d'eau.....	5
2.1.1 Conduites de distribution d'eau	5
2.1.2 Branchements d'eau.....	6
2.1.3 Robinets	6
2.1.4 Bornes d'incendie	7
2.2 Corrosion externe.....	7
2.2.1 Corrosion galvanique.....	7
2.2.2 Corrosion électrolytique	8
2.3 Corrosion interne	8
2.4 Facteurs qui contribuent à la détérioration et à la défaillance.....	9
2.5 Défaillance structurale des conduites de distribution d'eau.....	12
2.6 Avantages liés à la surveillance de la détérioration	13
3. Description des travaux	15
3.1 Généralités	15
3.2 Évaluation préliminaire.....	16
3.2.1 État structural	18
3.2.2 Capacité hydraulique	18
3.2.3 Fuites.....	19
3.2.4 Qualité de l'eau	19
3.3 Enquête approfondie	19
3.3.1 État structural	20
3.3.2 Capacité hydraulique	24
3.3.3 Fuites.....	24
3.3.4 Qualité de l'eau	24
4. Cas d'utilisation et restrictions	25
4.1 Cas d'utilisation	25
4.2 Restrictions	25
4.3 Résultats prévus	26
Annexe A : Rapport de rupture de conduite de distribution	27
Références	29

TABLEAUX

Tableau 2-1 : Matériaux courants de conduites d'eau.....	6
Tableau 2-2 : Facteurs qui contribuent à la détérioration d'un réseau de distribution d'eau	10
Tableau 2-3 : Modes de défaillance structurale des matériaux courants de conduites d'eau	13
Tableau 3-1 : Enquête sur les réseaux de distribution d'eau	17

FIGURES

Figure 2-1 : Modes de défaillance structurale des conduites d'eau	12
---	----

REMERCIEMENTS

Nous apprécions énormément le dévouement des personnes qui ont donné leur temps et partagé leur expertise dans l'intérêt du *Guide national pour des infrastructures municipales durables (InfraGuide)*, et nous les remercions.

La présente règle de l'art a été créée par des groupes intéressés des municipalités canadiennes et des spécialistes du Canada tout entier. Elle est fondée sur de l'information tirée de la revue des pratiques municipales et d'une analyse documentaire approfondie. Les membres du comité technique de l'eau potable du Guide national, dont on trouvera les noms ci-après, ont fourni des conseils et une orientation en rapport avec la rédaction du document. Ils ont été aidés par les employés de la direction d'InfraGuide et ceux de R.V. Anderson, en association avec Touchie Engineering, Urban Systems Limited et Réseau Environnement.

Carl Yates, président	Halifax Regional Water Commission (Nouvelle-Écosse)
Fred Busch	Maire, District de Sicamous (Colombie-Britannique)
Sukhi Cheema	Gouvernement des Territoires du Nord-Ouest
Normand DeAgostinis	Ductile Iron Pipe Research Association (Québec)
Tim Dennis	Ville de Toronto (Ontario)
Gordon Lefort	IPEX Inc., Langley (Colombie-Britannique)
André Proulx	Delcan (Ontario)
Diane Sacher	Ville de Winnipeg (Manitoba)
Piero Salvo	WSA Trenchless Consultants Inc. Ottawa (Ontario)
Ernie Ting	Ville de Markham (Ontario)
Normand Levac	Conseiller technique, CNRC

De plus, le Comité aimerait remercier les personnes qui suivent pour leur participation aux groupes de travail et aux révisions par les pairs.

Chado Brcic	Municipalité régionale de Niagara (Ontario)
Brian Crowe	Ville de Vancouver (Colombie-Britannique)
Normand DeAgostinis	Ductile Iron Pipe Research Association (Québec)
Gordon Lefort	IPEX Inc. (Colombie-Britannique)
Jon Makar	Institut pour la recherche en construction (Ontario)
David Raymond	Ville d'Ottawa (Ontario)
Douglas Seargeant	EPCOR Water Services (Alberta)

Cette règle de l'art n'aurait pu voir le jour sans le leadership et les conseils du comité directeur du projet et du comité directeur technique du *Guide national pour des infrastructures municipales durables (InfraGuide)* dont les membres sont comme suit :

Comité directeur du projet :

Mike Badham, Président	Conseiller, Régina (Saskatchewan)
Bill Crowther	Ville de Toronto (Ontario)
Jim D'Orazio	Greater Toronto Sewer and Watermain Contractors Association (Ontario)
Glen Everitt, Maire	Dawson City (Yukon)
Derm Flynn, Maire	Ville d'Appleton (Terre-Neuve-et-Labrador)
David General	Cambridge Bay (Nunavut)
Ralph Haas	Université de Waterloo (Ontario)
Barb Harris	Ville de Whitehorse (Yukon)
Robert Hilton	Bureau de l'infrastructure, Ottawa (Ontario)
Dwayne Kalynchuk	Ville de St. Albert (Alberta)
Marie Lemay	Conseil canadien des ingénieurs
Wayne Motheral	Conseiller, Louise (Manitoba)
Saeed Mirza	Université McGill, Montréal (Québec)
Lee Nauss	Conseiller, Lunenburg (Nouvelle-Écosse)
Ric Robertshaw	Région d'Halton, Ontario
Dave Rudberg	Ville de Vancouver (Colombie-Britannique)
Van Simonson	Ville de Saskatoon (Saskatchewan)
Basile Stewart, Maire	Ville de Summerside, (Île-du-Prince-Édouard)
Serge Thériault	Environnement et Gouvernements locaux (Nouveau-Brunswick)
Alec Waters	Alberta Transportation (Alberta)
Wally Wells	Dillon Consulting Ltd. (Ontario)

Liaison avec les intervenants :

Joan Loughheed	Conseillère, Burlington (Ontario)
----------------	-----------------------------------

Comité technique directeur :

Don Brynildsen	Ville de Vancouver (Colombie-Britannique)
Al Cepas	Ville d'Edmonton (Alberta)
Andrew Cowan	Ville de Winnipeg (Manitoba)
Tim Dennis	Ville de Toronto (Ontario)
Kulvinder Dhillon	Municipalité d'Halifax (Nouvelle-Écosse)
Wayne Green	Ville de Toronto (Ontario)
John Hodgson	Ville d'Edmonton (Alberta)
Bob Lorimer	Lorimer & Associates (Yukon)
Betty Matthews-Malone	Ville de Hamilton (Ontario)
Umendra Mital	Ville de Surrey (Colombie-Britannique)
Anne-Marie Parent	Conseillère, Montréal (Québec)
Piero Salvo	WSA Trenchless Consultants Inc. (Ontario)
Mike Sheflin	Ancien APA de la municipalité régionale d'Ottawa-Carleton (Ontario)
Konrad Siu	Ville d'Edmonton (Alberta)
Carl Yates	Halifax Regional Water Commission (Nouvelle-Écosse)

Membre fondateur :

Association canadienne des travaux publics (ACTP)

RÉSUMÉ

On trouvera dans le présent document les grandes lignes de la règle de l'art relative à l'inspection d'un réseau de distribution d'eau en vue de déceler tout signe de détérioration. On y décrit les processus de détérioration des réseaux de distribution d'eau potable et les facteurs qui peuvent avoir une incidence sur la vitesse à laquelle ceux-ci se détériorent.

Pour qu'une municipalité (ou une entreprise de service public) puisse minimiser les préoccupations en matière de santé et de sécurité, et offrir une réserve d'eau potable adéquate de manière rentable, fiable et durable, il faut que son réseau de distribution d'eau soit soumis à un programme d'inspection stratégique.

L'existence de un ou de plusieurs des phénomènes qui suivent peut être un indice de la détérioration d'un réseaux de distribution d'eau :

- une détérioration de la qualité de l'eau en raison de la corrosion interne des éléments constituants métalliques sans revêtement ou de mauvaises pratiques d'entretien;
- une réduction de la capacité hydraulique en raison de la corrosion interne (c'est-à-dire de la tuberculisation) des éléments constituants métalliques sans revêtement;
- un débit de fuite élevé en raison de la corrosion ou de la détérioration des joints;
- des ruptures fréquentes dues à la corrosion, à la dégradation du matériau, à de mauvaises pratiques de mise en place, à des défauts de fabrication ou aux conditions d'exploitation.

Puisque la majorité des réseaux de distribution d'eau sont constitués d'éléments métalliques, la corrosion peut être la cause de la détérioration au sein de certains environnements. Le document donne un aperçu des processus de corrosion interne et externe ainsi qu'une brève description de certains autres facteurs physiques, environnementaux et opérationnels qui peuvent contribuer à la détérioration et à la défaillance des réseaux.

La règle de l'art relative à la façon d'enquêter sur l'état des réseaux de distribution d'eau repose sur une approche en deux étapes. La première étape consiste en une évaluation préliminaire de l'ensemble du réseau pour ce qui est de l'état structural, de la capacité hydraulique, de la détection de fuites et de la qualité de l'eau. Pour ce faire, on utilise les données que chaque municipalité doit recueillir de façon systématique. L'évaluation préliminaire des ruptures dans les conduites de distribution, des plaintes des clients, des pertes d'eau ainsi que des

données sur l'échantillonnage et l'inspection de routine qui doivent avoir lieu une fois par année permettra de déterminer les tendances et la nécessité de mener des enquêtes plus poussées.

La deuxième étape consiste en une étude plus poussée de problèmes particuliers, en fonction de l'évaluation du niveau de service, de l'aspect économique, du risque et des avantages. Dans la présente règle de l'art, on définit les restrictions propres à certaines méthodes d'enquête approfondie.

1. GÉNÉRALITÉS

1.1 INTRODUCTION

On trouvera dans le présent document un aperçu de la règle de l'art relative à la façon d'inspecter un réseau afin de détecter les signes de détérioration. Les processus de détérioration des réseaux de distribution d'eau potable et les facteurs susceptibles d'influer sur la vitesse à laquelle un réseau se détériore y sont décrits. Selon la définition donnée dans le *Guide national pour des infrastructures municipales durables (InfraGuide)*, les règles de l'art sont les méthodologies et les technologies de pointe pour la planification, la conception, la construction, la gestion, l'évaluation, l'entretien et la réfection des infrastructures municipales qui tiennent compte des facteurs économiques, environnementaux et sociaux locaux.

La présente règle de l'art est fondée sur une analyse de la documentation déjà publiée ainsi que sur une enquête menée en 2001 auprès de 68 municipalités et services publics à travers le Canada. L'enquête comportait 30 questions portant sur les causes de la détérioration des conduites d'eau et les méthodes utilisées pour mesurer et atténuer le phénomène.

1.2 PORTÉE

On trouvera dans la présente règle de l'art la description des méthodologies et des technologies relatives à l'étude et à l'inspection des réseaux de distribution d'eau. Bien que les réseaux incluent les conduites de distribution, les branchements d'eau, les bornes d'incendie et les robinets, la majorité des propos tenus dans la présente règle de l'art se concentrent sur les conduites de distribution et les conduites maîtresses. Il n'est pas question ici des stations de traitement d'eau, des postes de relevage et des réservoirs.

1.3 QUESTIONS DE NATURE GÉNÉRALE CONCERNANT LA SANTÉ ET LA SÉCURITÉ

On doit concevoir, construire, exploiter et entretenir les réseaux de distribution d'eau de manière à pouvoir offrir une réserve adéquate d'eau de façon sécuritaire, rentable et fiable. Il faut une réserve d'eau adéquate pour maintenir la santé et la viabilité économique d'une collectivité. De plus, cette réserve représente une des principales exigences en matière d'extinction des incendies.

1.4 DURABILITÉ

La plupart des municipalités canadiennes¹ reconnaissent l'importance de gérer les réseaux de distribution d'eau comme des actifs. Cela est dicté par l'augmentation des besoins financiers liée à l'agrandissement et au vieillissement des réseaux

¹ Dans le présent document, le terme *municipalité* (ou *municipalités*) fait aussi référence à *l'entreprise de service public* (ou *entreprises de service public*) ou à tout autre fournisseur d'eau.

existants. L'Association canadienne des eaux potables et usées (ACEPU) a effectué en 1977 une étude qui avait pour but d'estimer les besoins financiers en matière d'infrastructures des eaux potables et usées pour la période de 1997 à 2012. L'étude a révélé qu'il y avait plus de 112 000 kilomètres de conduites de distribution d'eau au Canada, dont le coût de remplacement était estimé à 34 milliards de dollars. L'étude a aussi permis d'estimer qu'il faudrait investir une somme de 12,5 milliards de dollars sur une période de 15 ans pour remplacer les conduites existantes (détériorées) et construire de nouvelles conduites pour satisfaire les besoins liés à la croissance prévue. Étant donné l'ampleur de ces besoins, il est clair qu'on devra cibler l'affectation des fonds disponibles de la façon la plus efficace possible.

Il est essentiel que les municipalités comprennent bien les processus de détérioration des conduites de distribution et ce, pour être en mesure de gérer les réseaux de distribution d'eau de manière à pouvoir offrir une réserve d'eau potable adéquate de façon rentable, fiable et durable. Une bonne compréhension permettra aux municipalités de mettre en œuvre des mesures d'atténuation en temps opportun afin de prolonger la durée de vie fonctionnelle du réseau pour une période de temps optimale et ainsi minimiser l'ensemble des coûts économiques, sociaux et environnementaux liés à l'exploitation.

1.5 GLOSSAIRE

Agressif – Fait référence à une eau ou à un sol corrosif qui cause la détérioration du matériau de la canalisation de distribution d'eau.

Anode – Électrode dans une cellule de corrosion galvanique à partir de laquelle les électrons circulent.

Cathode – Électrode dans une cellule de corrosion galvanique vers laquelle les électrons circulent.

Centrifugée – Fait référence au procédé de fabrication des conduites de distribution en fonte qui consistait à couler de la fonte en fusion dans des moules horizontaux qui étaient ensuite centrifugés et dont l'extérieur était refroidi à l'eau.

Conduite de distribution essentielle – Conduite de distribution d'eau qui causerait des dommages matériels importants ou des dommages à l'environnement si elle défailait de façon catastrophique. Inclut aussi les conduites de distribution d'eau qui sont la principale source d'approvisionnement en eau d'une importante population ou de clients qui requièrent un niveau élevé de fiabilité.

Coulée en fosse – Fait référence au procédé de fabrication des conduites de distribution en fonte qui consistait à couler de la fonte en fusion dans des moules verticaux placés dans des fosses.

Défaillance – Incapacité d'un réseau à livrer de façon fiable et à une pression minimale un volume adéquat d'eau dont la qualité satisfait aux *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* (Santé Canada, 1996). On peut trouver un lien vers le résumé des recommandations à l'adresse http://www.hcsc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/bch_pubs/summary.pdf.

Fuite – Trou ou fuite au niveau du joint dans un réseau de distribution d'eau et qui est habituellement moins grave qu'une rupture.

Rupture – Défaillance mécanique ou structurale d'une conduite de distribution d'eau.

2. JUSTIFICATION

2.1 DÉTÉRIORATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

L'existence de un ou de plusieurs des phénomènes qui suivent indique que le réseau de distribution d'eau est détérioré :

- une détérioration de la qualité de l'eau en raison de la corrosion interne des éléments constitutants métalliques sans revêtement, de la formation d'un film biologique ou de mauvaises pratiques d'entretien;
- une réduction de la capacité hydraulique en raison de la corrosion interne (c'est-à-dire de la tuberculisation) des éléments constitutants métalliques sans revêtement ou des précipitations de carbonate de calcium;
- un débit de fuite élevé en raison de trous produits par la corrosion dans les tuyaux ou de la détérioration des joints;
- des ruptures fréquentes causées par la corrosion, la dégradation du matériau, de mauvaises pratiques de mise en place, des défauts de fabrication ou les conditions d'exploitation.

2.1.1 CONDUITES DE DISTRIBUTION D'EAU

Le tableau 2-1 présente la gamme des diamètres et des périodes de pose des matériaux de conduite de distribution les plus répandus ainsi que les normes et les manuels pertinents de la American Water Works Association (AWWA). L'Association canadienne de normalisation (CSA) a aussi publié des normes relatives à la fabrication de plusieurs matériaux.

Les tuyaux en fonte ainsi que ceux en fonte ductile représentent plus des deux tiers des conduites d'eau actuellement en service à travers le Canada (R.V. Anderson Associates Ltd., 2002). On utilise aussi l'acier, le chlorure de polyvinyle (CPV), le polyéthylène haute densité (PEHD), l'amiante-ciment et les tuyaux sous pression en béton.

Puisque la majorité des réseaux de distribution d'eau sont constitués d'éléments métalliques, la corrosion peut causer de la détérioration au sein de certains environnements. Un tuyau en chlorure de polyvinyle peut se détériorer à la suite d'une attaque chimique par certains solvants ou en raison d'une dégradation mécanique résultant de mauvaises méthodes de pose. On a observé la défaillance de tuyaux en polyéthylène haute densité en raison d'imperfections au niveau des joints, d'une dégradation du matériau ou d'une pose incorrecte. Il y aura détérioration de tuyaux en amiante-ciment et de revêtements en mortier de ciment en présence d'eau agressive qui lessive le ciment (Rajani, B. et Y. Kleiner, 2001). La détérioration des tuyaux sous pression en béton survient habituellement lorsqu'il y a une corrosion des fils pour béton précontraint, ce qui peut

causer la rupture du tuyau. Les autres problèmes liés aux tuyaux en béton sous pression sont la détérioration du béton et la corrosion de l'âme en acier

Tableau 2-1 : Matériaux de conduite d'eau répandus

Matériau de tuyauterie	Gamme de diamètres	Période de pose	Norme CSA	Norme AWWA	Manuel de l'AWWA
Fonte coulée en fosse	75 à 1 500 mm	1850 à 1940	-	C100 ¹	-
Fonte centrifugée	75 à 1 500 mm	1930 à 1960	-	C100 ¹	-
Fonte ductile	75 à 1 600 mm	Depuis les années 60	-	C151	M41
Acier	> 150 mm	Depuis 1850	Z245.1	C200	M11
Chlorure de polyvinyle (CPV)	100 à 1 200 mm	Depuis les années 70	B137.3	C900/905	M23
Polyéthylène haute densité (PEHD)	100 à 1 575 mm	Depuis les années 80	B137.1	C906	-
Amiante-ciment (AC)	100 à 1 050 mm	1930 à 1980	-	C400	-
Tuyau sous pression en béton	250 à 3 660 mm	Depuis les années 40	-	C300/301/ 302/303	M9

¹ Le tuyau en fonte conforme à la norme britannique est aussi souvent utilisé au Canada.

2.1.2 BRANCHEMENTS D'EAU

On construit habituellement les branchements d'eau de plus de 50 mm de diamètre en fonte, en fonte ductile ou en chlorure de polyvinyle. Ceux de 50 mm de diamètre ou moins sont habituellement en cuivre, en plomb, en fer galvanisé ou en polyéthylène. Les processus de détérioration des branchements d'eau sont semblables à ceux des conduites de distribution.

2.1.3 ROBINETS

On utilise des robinets dans les réseaux de distribution d'eau pour diverses raisons, notamment l'isolation, l'évacuation de l'air, le drainage ainsi que la vérification et la réduction de la pression. Le robinet d'isolement est le genre de robinet le plus fréquemment utilisé dans les réseaux de distribution. On utilise habituellement les robinet-vannes avec un boîtier de vanne pour isoler les conduites de distribution et les branchements d'eau de petit diamètre. Pour les conduites de distribution de gros diamètre, on utilise plutôt les robinets à papillon qui sont directement enfouis ou posés dans des chambres. On doit vérifier les robinets d'isolement régulièrement pour s'assurer qu'ils sont accessibles, dans la

bonne position (ouverte ou fermée) et manoeuvrables, et qu'ils ne fuient pas. Ces robinets sont sujets à se détériorer ou à se briser, par exemple parce que les filets de la tige sont arrachés, que celle-ci est brisée ou pliée, que le joint torique ou la garniture fuit, que le corps et les boulons de raccordement sont corrodés ou encore, que le disque ou le siège est usé.

2.1.4 BORNES D'INCENDIE

Les bornes d'incendie sont sujets de la même manière à la détérioration, à la défaillance et aux dommages causés par le gel. Toutefois, l'inspection et l'entretien des bornes d'incendie sont habituellement plus rigoureux que ceux des conduites de distribution et des robinets enfouis.

2.2 CORROSION EXTERNE

La corrosion est un problème important que certaines municipalités comprennent mal. Le manuel M27 de l'AWWA (AWWA, 1987) explique en détail la chimie de la corrosion externe ainsi que la façon de la prévenir en ce qui a trait aux matériaux de conduite d'eau les plus courants. La National Association of Corrosion Engineers (NACE International) a publié un manuel intitulé *Control of Pipeline Corrosion* (Peabody, A.W., 2001), dans lequel on décrit les processus de corrosion. Divers types de corrosion peuvent se manifester dans les conduites de distribution, notamment la corrosion galvanique, électrolytique, uniforme, localisée ou de cause microbiologique, de même que la corrosion par piqûres ou fissurante. La corrosion galvanique et la corrosion électrolytique sont les deux types les plus courants en ce qui a trait aux réseaux de distribution d'eau. Ils sont décrits ci-après.

2.2.1 CORROSION GALVANIQUE

La corrosion galvanique est un phénomène électrochimique qui peut se produire lorsque des métaux dissemblables sont raccordés électriquement et enfouis dans un sol uniformément conducteur ou lorsqu'un métal est enfoui dans un sol conducteur dont le caractère n'est pas uniforme. En présence de ces conditions, le courant électrique circule de l'anode à la cathode à travers la connexion. À mesure que l'anode perd des électrons, le métal qui la constitue s'oxyde et libère des ions dans l'électrolyte, ce qui entraîne la corrosion de l'anode. Pour compléter le circuit électrique, les ions de cathode présents dans l'électrolyte sont réduits et déposés sur la surface de la cathode, protégeant ainsi celle-ci contre la corrosion.

Dans les mêmes conditions, la fonte et la fonte ductile se corrodent à la même vitesse (De Rosa, P.J. and R.W. Parkinson, 1986). Des observations faites sur le terrain ont permis de constater que la fonte et parfois la fonte ductile pouvaient laisser une matrice en graphite qui conserve la forme du moulage initial. Bien que la matrice aie une résistance mécanique faible, elle peut dans certains cas résister aux pressions de service normales, à moins que le tuyau ne soit bougé.

On a récemment fait enquête auprès d'entreprises de service public choisies aux États-Unis et au Canada dans le but de déterminer les causes les plus répandues de la corrosion externe en ce qui a trait aux conduites d'eau (Romer, A.E. et G. Bell, 2001). L'enquête a révélé que 67 pour cent des répondants croyaient que les sols corrosifs représentaient la principale cause de la corrosion externe des conduites de distribution d'eau de leur réseau. Douze pour cent des répondants pensaient que la connexion directe de métaux dissemblables constituait la principale cause du problème et 10 pour cent d'entre eux croyaient que la corrosion était due à l'endommagement ou à la dégradation du revêtement.

2.2.2 CORROSION ÉLECTROLYTIQUE

La corrosion électrolytique (également appelée « corrosion par courants vagabonds ») apparaît dans une conduite de distribution quand celle-ci ramasse un courant vagabond provenant d'une source de courant continu, telle qu'un système de protection cathodique par courant imposé sur une canalisation adjacente, un réseau de tramway électrique ou de métro, ou un poste de soudage électrique. La corrosion électrolytique est semblable à la corrosion galvanique, sauf que ce sont des sources de courant externes qui alimentent la cellule électrolytique, tandis que la cellule galvanique est alimentée par des réactions chimiques. Lorsqu'un courant vagabond est poussé à travers une conduite de distribution par une source de courant externe, il en résulte de la corrosion à l'endroit où le courant vagabond quitte la conduite et rejoint la source de courant électrique (c'est-à-dire l'anode).

Le courant alternatif peut lui aussi produire de la corrosion électrolytique. La American Water Works Association Research Foundation (AWWARF) a étudié les effets de la mise à la terre des sources de courant alternatif sur l'intégrité d'une conduite de distribution. (Duranceau, S. et G. Bell, 1995). L'enquête a toutefois révélé que le courant alternatif produisait de la corrosion, bien qu'à un taux beaucoup plus bas comparativement au courant continu, soit environ 1 % du taux relatif à la même quantité de courant continu.

2.3 CORROSION INTERNE

Tous les tuyaux métalliques modernes sont munis d'un revêtement intérieur qui prévient la corrosion interne due à de l'eau douce ou agressive. Les anciens tuyaux métalliques peuvent toutefois ne pas avoir de revêtement et seraient donc sensibles à ce type de corrosion. La AWWARF a publié deux manuels qui décrivent en détail les processus liés à la corrosion interne et la façon de prévenir celle-ci (AWWARF/DVGW, 1986; AWWARF, 1989). Ce type de corrosion peut se manifester de différentes façons. On regroupe habituellement ces façons comme suit :

- la dégradation du tuyau (p. ex. corrosion par piqûres), qui peut entraîner des fuites ou rendre la conduite vulnérable à la défaillance mécanique;

- la tuberculisation et l'entartrage, qui peuvent réduire la capacité hydraulique de la conduite et avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau;
- le rejet d'un dérivé de la corrosion (p. ex : de l'eau rouge ou rouillée), qui peut avoir une incidence négative sur la qualité de l'eau.

Les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de l'eau peuvent avoir une incidence sur le taux de corrosion interne. Il est important de noter que la détérioration d'un réseau de distribution peut avoir une incidence sur les caractéristiques de l'eau et que celle-ci peut à son tour avoir une incidence sur la vitesse de détérioration du réseau.

Les oxydes métalliques résultant de la corrosion sous forme de piqûres peuvent former des tubercules qui recouvrent alors les piqûres. Ces tubercules grossissent progressivement et réduisent la capacité hydraulique du tuyau. De plus, si l'eau qui circule dans le tuyau est sursaturée de carbonate de calcium, celui-ci peut précipiter et entraîner la formation d'un encroûtement de la paroi des conduites.

2.4 FACTEURS QUI CONTRIBUENT À LA DÉTÉRIORATION DES CONDUITES DE DISTRIBUTION D'EAU

Un grand nombre de facteurs peuvent avoir une incidence sur la vitesse de détérioration des réseaux de distribution d'eau et entraîner une défaillance. On trouvera dans le tableau 2-2 le résumé d'un certain nombre de facteurs physiques, environnementaux et opérationnels.

Tableau 2–2 : Facteurs qui contribuent à la détérioration d'un réseau de distribution d'eau

Facteur		Explication
Physique	Matériau du tuyau	La nature de la défaillance varie selon le matériau du tuyau.
	Épaisseur de la paroi du tuyau	La corrosion pénètre plus rapidement dans une paroi moins épaisse.
	Âge du tuyau	Les effets de la dégradation du tuyau deviennent plus visibles avec l'âge.
	Époque de fabrication du tuyau	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.
	Type de joints	Certains types de joint ont connu une défaillance prématurée (p. ex. joints au plomb).
	Retenue de la poussée	Si la retenue de la poussée est inadéquate, les efforts longitudinaux risquent d'augmenter.
	Revêtements intérieur et extérieur du tuyau	Les tuyaux munis d'un revêtement sont moins sensibles à la corrosion.
	Métaux dissemblables	Les métaux dissemblables sont sensibles à la corrosion galvanique.
	Pose des tuyaux	De mauvaises pratiques en ce qui a trait à la pose peuvent endommager les tuyaux, les rendant ainsi plus vulnérables à la défaillance.
	Fabrication des tuyaux	Les tuyaux peuvent être plus vulnérables la défaillance en raison d'imperfections dans les parois résultant d'erreurs de fabrication. Ce problème est plus fréquent dans les anciens tuyaux en fonte coulée en fosse.

Environnemental	Assise du tuyau	Une mauvaise assise peut entraîner la défaillance prématurée du tuyau.
	Matériau de remblai des tranchées	Certains matériaux de remblai sont sensibles à la corrosion ou au gel.
	Type de sol	Certains sols sont corrosifs; dans le cas de certains sols, la modification de la teneur en humidité entraîne un important changement de volume, ce qui modifie le chargement des conduites. La présence d'hydrocarbures ou de solvants dans le sol risque de causer une certaine détérioration des tuyaux.
	Eaux souterraines	Certaines eaux souterraines peuvent être agressives pour certains matériaux de tuyauterie.
	Climat	Le climat a une influence sur la pénétration du gel et l'humidité du sol. On doit tenir compte du pergélisol dans les régions nordiques.
	Emplacement du tuyau	La migration du sel routier dans le sol peut augmenter le taux de corrosion.
	Mouvements	Certains mouvements souterrains dans l'environnement immédiat d'un tuyau peuvent endommager ou modifier la structure de charge et de soutien du tuyau.
	Courant électrolytique	Les courants vagabonds causent de la corrosion électrolytique.
	Activité sismique	L'activité sismique peut augmenter les efforts qui s'exercent sur un tuyau et causer des variations de pression.
Opérationnel	Pression interne de l'eau et variation de la pression	Des modifications à la pression interne de l'eau auront une incidence sur les efforts qui s'exercent sur le tuyau.
	Fuite	Une fuite corrode l'assise du tuyau et fait augmenter la teneur en humidité du sol dans les environs immédiats du tuyau.
	Qualité de l'eau	Il existe de l'eau agressive qui favorise la corrosion.
	Vitesse d'écoulement	Le taux de corrosion interne est plus élevé dans les conduites de distribution en cul-de-sac sans revêtement intérieur.
	Possibilités de retour d'eau	Les connexions croisées avec des réseaux qui ne contiennent pas d'eau potable peuvent causer la contamination du réseau de distribution.
	Pratiques d'exploitation et d'entretien	De mauvaises pratiques peuvent compromettre l'intégrité structurale des tuyaux et la qualité de l'eau.

2.5 DÉFAILLANCE STRUCTURALE DES CONDUITES DE DISTRIBUTION D'EAU

Les conduites de distribution se rompent habituellement lorsque l'étendue de la corrosion (ou de la dégradation) est suffisante pour empêcher la conduite de résister aux contraintes qu'elle subit. La figure 2-1 illustre les types de ruptures les plus courants dans le cas des conduites de distribution ainsi que les efforts qui s'exercent sur le tuyau et causent la rupture. Des travaux effectués récemment par le CNRC montrent que la défaillance se produit souvent en plusieurs étapes plutôt que d'un seul coup. Un tuyau qui subit une défaillance au niveau du cylindre peut se rompre partiellement, rester dans le sol pendant quelque temps et peut-être fuir, et ensuite fendre complètement. Le tableau 2-3 résume les modes de défaillance structurale pour chacun des matériaux les plus répandus.

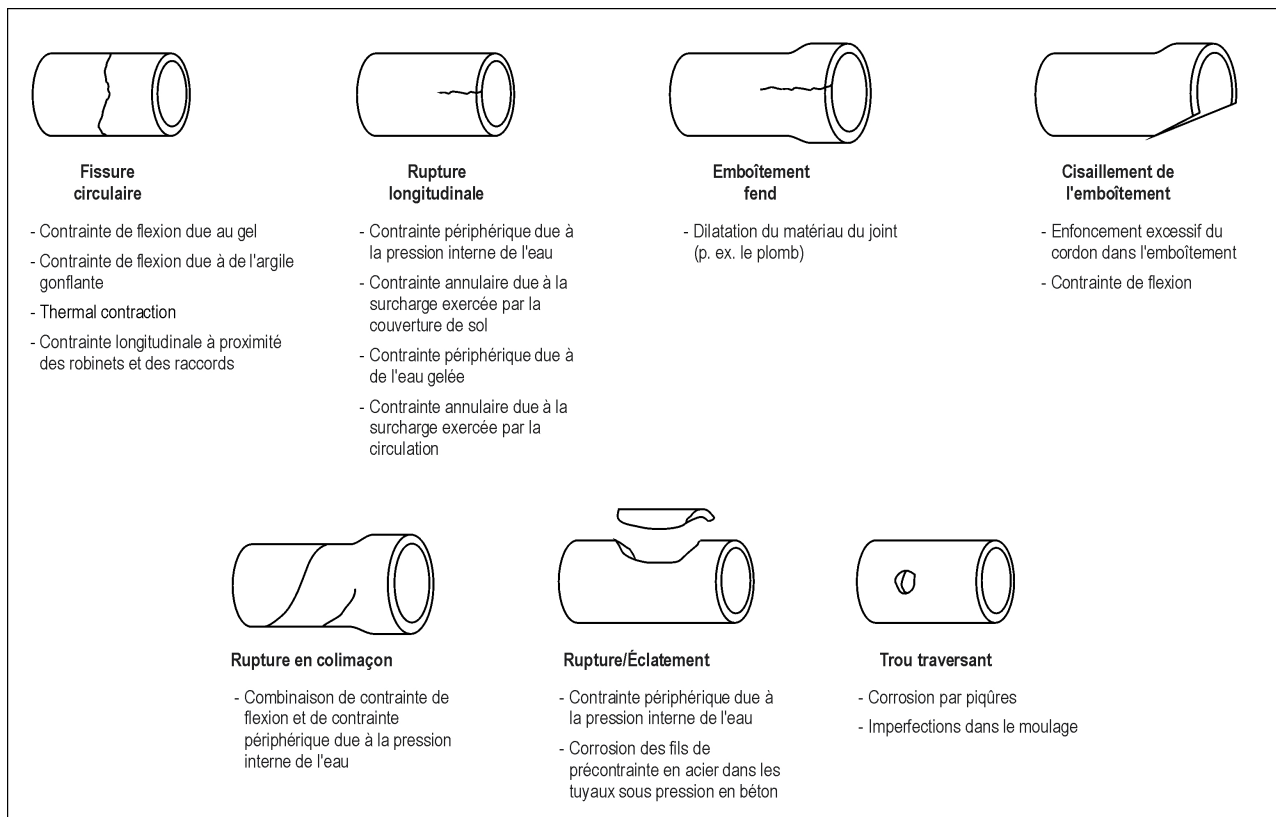


Figure 2-1 : Modes de défaillance des conduites de distribution

Tableau 2-3 : Modes de défaillance structurale des matériaux de conduite de distribution répandus

Matériau de conduite de distribution	Modes de défaillance structurale (voir la figure 1)
Fonte¹ <ul style="list-style-type: none"> • Petit diamètre (< 375 mm) • Gros diamètre (> 500 mm) • Diamètre moyen (de 375 à 500 mm) 	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptures circulaires, emboîtement fendu et corrosion sous forme de trous traversants • Ruptures longitudinales, emboîtement cisailé et corrosion sous forme de trous traversants • Même chose que pour les tuyaux de petit diamètre, en plus de ruptures longitudinales et de fissures en colimaçon, et de tronçons éclatés
Fonte ductile	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion sous forme de trous traversants
Acier	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosion sous forme de trous traversants; les tuyaux de gros diamètre sont vulnérables à l'effondrement
Chlorure de polyvinyle	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptures longitudinales causées par de trop grandes contraintes mécaniques • Sensibilité aux ruptures à la suite d'impacts dans des conditions de froid extrême (grand Nord)
Polyéthylène haute densité (PEHD)	<ul style="list-style-type: none"> • Imperfections au niveau des joints, dégradation mécanique en raison de mauvaises méthodes de pose et sensibilité à l'effondrement causé par le vide en présence d'indices de faible pression
Amiante-ciment (AC)	<ul style="list-style-type: none"> • Ruptures circulaires et dégradation du tuyau dans de l'eau agressive • Fentes longitudinales
Tuyau sous pression en béton	<ul style="list-style-type: none"> • Les tuyaux contenant des fils précontraints peuvent se rompre en raison d'une perte de précontrainte à la suite de défaillances multiples au niveau des fils • Dégradation du tuyau dans des sols particulièrement agressifs, corrosion de l'âme en acier et béton endommagé en raison de mauvaises méthodes de pose

¹ Se reporter à Makar, J.M., R. Desnoyers et S.E. McDonald (2001) pour une description des modes et mécanismes de défaillance des conduites en fonte grise.

2.6 AVANTAGES LIÉS À LA SURVEILLANCE DE LA DÉTÉRIORATION DES RÉSEAUX DE DISTRIBUTION D'EAU

La liste qui suit résume certaines raisons qui expliquent les avantages liés à la surveillance de la détérioration des réseaux de distribution d'eau :

- préserver la qualité de l'eau dans le réseau de distribution;
- améliorer et accroître la planification de l'entretien et des immobilisations;
- repérer les besoins urgents de réparation ou de remplacement;

- mettre à jour l'inventaire de l'état du réseau;
- faciliter la planification stratégique et l'inspection rentable;
- fournir des données servant aux analyses des risques;
- faciliter les programmes de gestion d'actifs;
- faire preuve de diligence raisonnable;
- fournir des données utilisées dans les normes de conception et les devis de construction;
- minimiser la contribution énergétique nécessaire dans les régions nordiques;
- améliorer la planification de l'actif et la priorisation des conduites non essentielles;
- faciliter la gestion des risques liés aux conduites essentielles;
- permettre de prédire la durée de vie des éléments d'actif du réseau de distribution d'eau en rapport avec la gestion de l'actif; et
- fournir un retour d'information sur les problèmes de fabrication et de pose.

3. DESCRIPTION DES TRAVAUX

3.1 GÉNÉRALITÉS

La règle de l'art relative à l'étude de l'état des réseaux de distribution d'eau repose sur une approche en deux étapes. La première étape consiste en une évaluation préliminaire de l'ensemble du réseau pour ce qui est de l'état structural, de la capacité hydraulique, de la détection de fuites et de la qualité de l'eau. Pour ce faire, on utilise les données que chaque municipalité doit recueillir de façon systématique. La deuxième étape consiste en une étude plus poussée de problèmes particuliers fondée sur les résultats de l'évaluation préliminaire.

La présente règle de l'art s'applique aux conduites de distribution tant non essentielles qu'essentielles. Ces dernières peuvent inclure les conduites de distribution qui :

- causeraient des dommages importants à l'environnement ou à une propriété si elles se ruptureraient de façon catastrophique;
- sont la principale source d'approvisionnement en eau d'une population importante ou de clients qui requièrent un niveau élevé de fiabilité (p. ex. les hôpitaux et certaines industries).

Les municipalités doivent surveiller l'état de leurs conduites de distribution non essentielles dans le but de « gérer » la défaillance et de minimiser le **coût** d'exploitation et d'entretien de ce type de conduites. Par ailleurs, les municipalités doivent surveiller l'état des conduites de distribution essentielles dans le but d'en minimiser la **défaillance**. Dans le cas d'un réseau de distribution d'eau, on définit celle-ci comme l'incapacité du réseau à livrer de façon fiable et à une pression minimale des volumes d'eau adéquats dont la qualité tient compte, au minimum, des *Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada* (Santé Canada, 1999). On peut trouver un lien vers le résumé des recommandations à l'adresse http://www.hc-sc.gc.ca/ehp/ehd/catalogue/bch_pubs/summary.pdf.

C'est habituellement la défaillance des conduites de distribution individuelles en raison d'un taux de rupture et d'un débit de fuites élevés qui dicte le besoin de remplacer les canalisations ou, dans certains cas, d'utiliser des revêtements structuraux. Toutefois, la défaillance des conduites de distribution en ce qui a trait à la capacité hydraulique ou à la qualité de l'eau ne nécessite pas toujours un remplacement, puisqu'il pourrait être plus rentable de remettre les conduites en état. C'est un programme de gestion d'actifs qui doit indiquer l'intervention appropriée, c'est-à-dire le remplacement ou la remise en état.

Tableau 3–1 : Enquête sur les réseaux de distribution d'eau

Problème	Évaluation préliminaire	Raisons justifiant une enquête plus approfondie	Enquête approfondie
État structural	<ul style="list-style-type: none"> Analyse spatiale et temporelle des ruptures de conduites de distribution d'eau Compilation d'une carte des sols Inspection de routine des robinets et des bornes d'incendie Inspection de routine de l'isolation et du réchauffage des conduites dans les régions nordiques 	<p>Niveau de service</p> <ul style="list-style-type: none"> Les évaluations préliminaires indiquent un taux de ruptures et un débit de fuites excessifs, une capacité hydraulique inadéquate ou une mauvaise qualité de l'eau <p>Rentabilité</p> <ul style="list-style-type: none"> Pour faciliter la planification des immobilisations et les programmes de gestion d'actifs Pour faire des essais pilotes en ce qui a trait aux nouvelles technologies afin de faciliter le soutien de la planification à long terme Pour effectuer du travail opportuniste, comme par exemple lorsqu'une conduite de distribution est hors service <p>Gestion des risques</p> <ul style="list-style-type: none"> Une analyse des risques a permis de repérer des conduites de distribution essentielles présentant un potentiel élevé de dommages à la propriété, d'impact sur l'environnement ou de perte de service Diligence raisonnable (p. ex. étude de défaillance d'une conduite de distribution essentielle) 	<ul style="list-style-type: none"> Étude approfondie des modèles, des tendances et des taux relatifs aux ruptures Modèles statistique et physique Échantillonnage de tuyaux Mesures du taux de corrosion dans le sol Mesures de la profondeur des piqûres Essais non destructifs Étude de défaillance Inspection visuelle Étude thermique (régions nordiques éloignées)
Capacité hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> Plaintes de pression faible Essais hydrauliques Présences d'eau contenant de la rouille ou colorée Inspection visuelle de l'intérieur des tuyaux Surveillance de la pression et des coûts de pompage 		<ul style="list-style-type: none"> Vérification du coefficient de rugosité Hazen-Williams Modélisation mathématique
Fuite	<ul style="list-style-type: none"> Vérification de l'utilisation de l'eau Demande d'eau par habitant Enquête périodique sur la détection de fuites 		<ul style="list-style-type: none"> Enquête de détection de fuites Fuites à l'intérieur d'une zone restreinte détaillée/Évaluation de la demande
Qualité de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> Plaintes relatives à la qualité de l'eau Information relative à l'échantillonnage périodique Résultats du programme de nettoyage par chasse d'eau 		<ul style="list-style-type: none"> Enquête approfondie sur la qualité de l'eau Modélisation mathématique

3.2 ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE

Le meilleur moyen d'enquêter sur l'état d'un réseau de distribution consiste à analyser périodiquement les données disponibles et facilement accessibles. On trouvera dans le tableau 3–1 le résumé du genre de données qu'on devrait utiliser pour procéder à l'évaluation préliminaire de chacun des quatre types de problèmes courants qui peuvent survenir dans les réseaux de distribution d'eau.

3.2.1 ÉTAT STRUCTURAL

Les municipalités doivent enregistrer sur support électronique l'emplacement et les détails relatifs aux ruptures de conduites de distribution d'eau, bien que celles de petite taille dont les ressources sont limitées risquent de devoir mettre cette pratique en œuvre de façon graduelle. On peut faire de nombreuses observations au moment de la réparation d'une rupture, ce qui facilite l'étude approfondie des enregistrements des ruptures et permet de mettre l'inventaire du réseau à jour. On trouvera à l'annexe A un formulaire qui résume l'information qu'on doit enregistrer pour chaque cas de rupture.

On doit compiler et examiner le nombre des ruptures qui se produisent chaque année afin de déceler les tendances. Le nombre acceptable de ruptures par année varie selon la municipalité et il n'est pas aussi important que les tendances à long terme. Il est essentiel de recueillir suffisamment d'information pour que l'étude soit statistiquement significative.

On doit afficher l'emplacement de toutes les ruptures sur une carte du réseau pour déterminer si celles-ci sont plus fréquentes dans certaines zones. La compilation électronique des enregistrements facilite l'étude spatiale et temporelle des ruptures. Par exemple, si on compile les enregistrements à l'aide d'un système d'information géographique (SIG), on pourra afficher les ruptures pour une année déterminée ou la période complète d'enregistrement. Il faut idéalement comparer les enregistrements de ruptures à une carte des sols pour déterminer s'il existe un lien entre les types de sol et la fréquence des ruptures. Pour faciliter l'étude spatiale, il faut faire attention d'enregistrer correctement l'emplacement de chaque rupture. On peut utiliser un système de positionnement global (GPS) pour repérer avec exactitude l'emplacement des ruptures.

3.2.2 CAPACITÉ HYDRAULIQUE

On peut utiliser les plaintes de pression faible dans l'évaluation préliminaire d'un réseau de distribution d'eau. Les municipalités doivent enregistrer sur support électronique l'emplacement et les détails relatifs à ce genre de plaintes. Si le nombre de plaintes augmentent avec le temps, cela pourrait vouloir dire que la capacité hydraulique du réseau se détériore. Une étude spatiale des plaintes pourrait aider à repérer les causes possibles du problème (p. ex. des conduites de distribution en fonte sans revêtement qui présentent un nombre élevé de tubercules ou des variations de pression dues à l'altitude). Pour refléter adéquatement l'état du réseau, on doit exclure de l'étude les plaintes de pression faible liées à des activités de construction ou d'entretien (p. ex. nettoyage par chasse d'eau, réparations, nouvelle construction).

On doit compiler les résultats des essais hydrauliques de manière à faciliter la conduite d'une étude spatiale et temporelle semblable à celle menée pour les ruptures de conduites de distribution et les plaintes de pression faible. Une faiblesse dans le cas des débits nécessaires à l'extinction des incendies peut être

due à une tuberculisation dans les conduites ou à des vannes d'isolement partiellement fermées. Le manuel M32 de la AWWA (AWWA, 1989) explique la façon de procéder pour vérifier le débit d'une borne d'incendie.

Une inspection visuelle ou à l'aide d'une caméra de l'intérieur des conduites de distribution peut aussi révéler l'ampleur de la tuberculisation et de l'encroûtement. On peut également déterminer l'état de l'intérieur d'une conduite de distribution en inspectant l'eau visuellement lorsqu'on procède à un nettoyage par chasse d'eau.

3.2.3 FUITES

La détection de fuites peut être un outil important à utiliser pour déterminer la détérioration des réseaux de distribution d'eau. On trouvera des renseignements détaillés sur l'utilisation et les pertes d'eau dans une autre règle de l'art du Guide national pour des infrastructures municipales durables.

3.2.4 QUALITÉ DE L'EAU

On peut effectuer une évaluation préliminaire de la qualité de l'eau dans un réseau de distribution en utilisant les enregistrements des plaintes au sujet de la qualité de l'eau et les données de surveillance périodique. On doit enregistrer ce type de plaintes de la même manière que celles relatives à la pression faible et aux ruptures de conduites. Pour refléter adéquatement l'état du réseau, on doit exclure de l'étude les plaintes au sujet de la qualité de l'eau liées à des activités de construction et d'entretien (p. ex. nettoyage par chasse d'eau, réparations, nouvelle construction). On doit toutefois les examiner pour déterminer s'il y a lieu de modifier l'exploitation du réseau.

L'analyse continue des données sur la qualité de l'eau indiquera si celle-ci change dans le réseau au fil du temps. Plus particulièrement, de faibles résidus de chlore dans certains tronçons du réseau pourraient indiquer la détérioration des conduites dans ce tronçon. De la même manière, une concentration de fer dans l'eau peut indiquer le degré de corrosion de l'intérieur des conduites de distribution sans revêtement.

3.3 ENQUÊTE APPROFONDIE

On peut déterminer le besoin d'un programme d'inspection plus approfondie d'après les résultats de l'enquête préliminaire. On doit déterminer l'étendue du programme d'inspection à partir d'une évaluation du niveau de service, de l'aspect économique, du risque et des avantages. Ces derniers peuvent être de nature économique, sociale ou environnementale. Par exemple, le coût d'une étude détaillée de l'état structural d'un réseau de distribution ne devrait pas être plus élevé que l'avantage éventuel connexe. De la même manière, le coût d'un programme de réduction des pertes d'eau devrait être inférieur à tout avantage éventuel. Le tableau 3-1 présente les méthodes et les techniques qu'on peut utiliser dans le cadre d'une enquête approfondie.

3.3.1 ÉTAT STRUCTURAL

Une évaluation préliminaire des enregistrements des ruptures qui indique une détérioration de l'état structural du réseau peut justifier une enquête approfondie. Celle-ci pourrait alors inclure une ou plusieurs des études suivantes :

a) Tendances relatives aux ruptures

L'étude des enregistrements des ruptures permet de repérer les tendances qui se manifestent dans l'ensemble du réseau, telles que :

- **le matériau** – Un lien entre les types de matériau;
- **l'époque de fabrication** – Les tuyaux fabriqués à certaines époques sont plus sensibles que d'autres à la défaillance;
- **le diamètre** – Ce sont habituellement les conduites en fonte grise de petit diamètre qui présentent le plus grand nombre de ruptures dans un réseau, puisqu'elles sont plus sensibles à la défaillance au niveau du cylindre que les conduites de distribution de gros diamètre;
- **le type de fissure** – Comme on l'a dit à l'article 2.5, le type de fissure constitue un bon indicateur quant à la cause de celle-ci (les ruptures circulaires sont plus fréquentes dans les conduites de distribution en fonte de petit diamètre, tandis que les ruptures longitudinales sont plus fréquentes dans les conduites de gros diamètre);
- **la variation saisonnière** – Dans la plupart des municipalités canadiennes, le nombre de ruptures dans les conduites de distribution en fonte est plus élevé durant les mois d'hiver. On attribue habituellement ce phénomène aux efforts supplémentaires qui s'exercent sur les tuyaux à cause du gel et des contractions thermiques;
- **le type de sol** – Certains sols sont beaucoup plus corrosif ou réactif que d'autres.

b) Étude spatiale des ruptures

On peut utiliser un système d'information géographique (SIG) pour mener une étude spatiale sur le taux de ruptures. On peut par exemple entrer divers types de renseignements dans le SIG, tels que le matériau, le diamètre et l'époque de fabrication des tuyaux, le type de sol, son taux de corrosion, son taux de réactivité, les lignes de faille sismique, les branchements d'eau et les sources de courants vagabonds, pour en évaluer l'incidence possible sur le taux de ruptures.

c) Taux de ruptures

L'inventaire d'un réseau de distribution inclut habituellement le diamètre, la longueur et le matériau pour chaque tronçon de la conduite de distribution². Dans le cas présent, on peut normaliser le taux de ruptures de chaque tronçon en divisant le nombre total de ruptures dans le tronçon par la longueur de la conduite de distribution et la période d'enregistrement (exprimé en ruptures/km/année). De cette façon, on peut facilement repérer les conduites de distribution qui présentent un taux de ruptures élevé. On peut procéder à une analyse économique et déterminer le taux de ruptures critique qui indique le moment où il est plus rentable de remplacer la conduite que de continuer à la réparer.

d) Modèles physique et statistique

Le Conseil national de recherches Canada (CNRC) a récemment mené une étude approfondie des modèles physique et statistique créés pour évaluer la détérioration structurale des conduites de distribution d'eau (Rajani et Kleiner, 2001; Kleiner, Y. et B. Rajani, 2001).

e) Échantillonnage de tuyaux

Pour procéder à un échantillonnage de tuyaux, on prélève des tronçons de tuyaux de conduites de distribution et de conduites maîtresses lorsque ceux-ci sont exposés, soit durant la réparation de ruptures, soit en toute autre occasion. L'objectif principal de l'échantillonnage de tuyaux est de déterminer l'état de la canalisation locale en examinant le matériau des tuyaux dans le but de repérer toute détérioration, de la façon décrite à l'article 3.2 de la présente règle de l'art. L'échantillonnage offre aussi l'occasion d'examiner le succès obtenu avec les méthodes utilisées pour remettre les conduites en état, telles que le revêtement ou la protection cathodique. Pour ce faire, on doit toutefois connaître l'état de la conduite avant sa réfection.

On peut avoir recours à un échantillonnage périodique pour effectuer un suivi de la détérioration à long terme des conduites de distribution. Il faut alors idéalement prélever un échantillon de chaque conduite crevée et ce, même si on n'envisage pas de mener une étude complète sur la défaillance. Le coût du prélèvement et de l'analyse des échantillons peut toutefois exclure une telle fréquence. Les entreprises de service public de distribution d'eau doivent donc établir un pourcentage relativement à la défaillance totale annuelle là où on doit prélever les échantillons. Le choix de l'emplacement et du moment du prélèvement des échantillons doit être fonction chaque année d'un nombre déterminé de ruptures de tuyaux ou d'endroits précis dans le réseau de distribution d'eau.

² On définit un tronçon de conduite de distribution par ses nœuds « de et à ». Un nœud est une connexion entre deux tuyaux (p. ex. un té ou une croix), un robinet ou un changement dans les caractéristiques du tuyau (p. ex. le diamètre, le matériau et la direction).

f) Mesure du taux de corrosion du sol

Le type de sol et le taux de corrosion peuvent représenter des facteurs clés de la détermination de la probabilité de détérioration des éléments constitutifs métalliques des réseaux de distribution d'eau. Le prélèvement d'échantillons de sol dans le but de mesurer le taux de corrosion peut aider à déterminer la vulnérabilité de ces éléments et ce, à un coût peu élevé, surtout lorsqu'on prélève les échantillons de façon opportuniste, comme par exemple durant des travaux d'excavation liés à la réparation de tuyaux. Le taux de corrosion du sol peut varier considérablement, même dans des régions qui présentent le même type de sol. Il devient donc nécessaire de prélever les échantillons lorsqu'il est possible de le faire, plutôt qu'en se fiant à des cartes des sols.

La résistivité est un des paramètres les plus importants de l'évaluation du taux de corrosion du sol. Ce n'est toutefois pas le seul que l'on doit considérer. On trouve une grande variété de sels solubles dans les sols. Certains d'entre eux peuvent provenir d'une migration du sel routier. Lorsque présents dans le sol, ces sels auront tendance à produire des valeurs de résistivité faibles. Ils auront aussi une incidence sur divers matériaux de tuyaux et celle-ci se manifestera de différentes façons. La plupart des constituants qui accélèrent le processus de corrosion sont les chlorures, les sulfates et l'acidité du sol (pH) (Peabody, A.W., 2001). Selon le matériau utilisé, on doit prendre tous ces paramètres en compte lorsqu'on analyse le taux de corrosion du sol. D'autres éléments, tels que le calcium, le magnésium et les bicarbonates dans un environnement basique, pourraient protéger le tuyau de la corrosion. On peut aussi tenir compte de ces éléments dans le cadre d'une analyse du sol.

On peut analyser les échantillons de sol sur place ou en laboratoire. L'analyse sur place doit se limiter à de simples mesures, telles que la résistivité du sol, tandis que l'analyse plus complète peut se faire en laboratoire. On doit prélever les échantillons de sol à la profondeur de la canalisation. On doit inclure des échantillons individuels prélevés dans le sol à l'emplacement de la rupture et plus loin dans l'excavation. On peut cerner plus facilement les zones dans lesquelles la résistivité change, ce qui représente une probabilité plus élevée en ce qui a trait à la formation d'une cellule de corrosion différentielle, en prélevant plusieurs échantillons dans une seule excavation. Peabody explique la bonne marche à suivre pour prélever des échantillons de sol. La norme C105 de la AWWA présente un système en 10 points servant à évaluer le taux de corrosion du sol.

g) Mesures de la profondeur des piqûres

On peut aussi utiliser les mesures de la profondeur des piqûres dans le cadre d'une enquête approfondie sur les conduites de distribution. Il est à noter que des échantillons provenant d'un seul tuyau ne sont pas particulièrement utiles pour évaluer l'état d'un tronçon de la conduite de distribution. Les mesures de la profondeur des piqûres peuvent toutefois être utiles pour la vérification d'essais non destructifs. La National Association of Corrosion Engineers (NACE

International, 1992) a publié un document intitulé *Standard Recommended Practices and Standard Test Methods*, qui sert à évaluer l'intégrité d'une canalisation.

h) Surveillance de la protection cathodique

Dans certains cas, on met en place des systèmes de protection cathodique dans des réseaux de distribution d'eau existants, dans le but de réduire le taux de corrosion. Tous les systèmes de ce genre sont des systèmes au fonctionnement actif. Ils nécessitent une surveillance et un entretien occasionnel. Les systèmes de protection cathodique bien conçus comportent des installations d'essais et des procédures de surveillance du système une fois celui-ci en fonction (NACE International, 1992). On peut obtenir une indication du niveau de protection cathodique obtenu en mesurant périodiquement la tension entre le tuyau et le sol le long d'une conduite de distribution. De plus, on peut estimer la durée de vie des anodes en mesurant périodiquement le flux de courant aux postes d'essai.

i) Essais non destructifs

Le CNRC (Makar, J. et N. Chagnon, 1999) a récemment examiné plusieurs types de méthodes servant à soumettre les tuyaux en fonte et les tuyaux sous pression en béton à des essais non destructifs. Parmi les méthodes particulièrement importantes, mentionnons l'utilisation de l'effet de champ afin de localiser des piqûres de corrosion dans les conduites de distribution de petit diamètre en fonte ou en fonte ductile ainsi que la technique par courants de Foucault et champ éloigné, et le contrôle d'émission acoustique afin de détecter des bris de fils dans des tuyaux sous pression en béton. Il a été démontré que la résistance à la polarisation linéaire pouvait établir une relation entre le taux de corrosion et les caractéristiques de certains types de sol. De nouvelles technologies pourraient être développées à l'avenir et on devrait envisager de les utiliser au fur et à mesure qu'elles deviennent accessibles.

j) Analyse des défaillances

Le CNRC (Makar, J., 2001) a élaboré une méthode à utiliser pour analyser les ruptures de conduites de distribution dans le but de mieux en comprendre les causes. Il est ensuite possible d'utiliser l'information recueillie pour améliorer la gestion d'un réseau de distribution d'eau. On recommande de procéder à l'analyse des défaillances dans les situations suivantes :

- les vieux tuyaux en fonte coulée en fosse présentent fréquemment des défaillances, puisqu'ils sont peut-être moins résistants en raison des normes de fabrication de l'époque;
- certaines zones présentent un taux de ruptures exceptionnellement élevé et ce, sans raison apparente;
- en présence de conduites de distribution de gros diamètre.

L'analyse des défaillances comprend habituellement une analyse de la surface de fracture, le mesurage de la résistance mécanique et le repérage d'imperfections dans la coulée.

3.3.2 CAPACITÉ HYDRAULIQUE

On peut vérifier le coefficient de rugosité Hazen-Williams pour quantifier la capacité hydraulique d'une conduite de distribution. Le manuel M32 de la AWWA (AWWA, 1989) explique la marche à suivre dans ce cas. On peut aussi utiliser la modélisation mathématique pour cerner la diminution potentielle de la capacité hydraulique en raison d'une tuberculisation ou d'un encroûtement. Il est possible d'évaluer la capacité hydraulique d'une conduite de distribution par rapport à la valeur prévue en comparant les résultats obtenus au cours de l'analyse à l'information publiée.

3.3.3 FUITES

On peut utiliser plusieurs techniques pour localiser les fuites dans un réseau de distribution d'eau. On pourra trouver de plus amples renseignements à ce sujet dans le guide de règle de l'art sur l'utilisation et les pertes d'eau.

3.3.4 QUALITÉ DE L'EAU

Si l'évaluation préliminaire indique un problème possible de qualité de l'eau, on peut mettre en œuvre une surveillance plus complète et un programme de modélisation pour se concentrer sur les paramètres en cause. Par exemple, de fortes concentrations de fer dans des échantillons d'eau peuvent indiquer la présence de corrosion interne dans les conduites de distribution.

On a élaboré plusieurs indices de corrosion pour évaluer le potentiel de corrosion relatif à la qualité de l'eau. L'indice de Langelier, qui indique que l'eau est entartrée ou corrosive, représente le meilleur indice dans le cas des tuyaux en fonte sans revêtement. Dans le passé, les entreprises et organismes de production et de distribution d'eau ont fait grand usage de l'indice de Langelier pour contrôler la corrosion de nombreux matériaux, parce qu'on avait supposé que le CaCO_3 était un élément constituant essentiel des calamines protectrices. Cependant, à la lumière de l'importante évidence empirique qui contredit la supposée connexion entre l'indice de Langelier et la corrosion, la Research Foundation de l'AWWA recommande l'abandon de la pratique (AWWARF/DVGW, 1996).

L'indice d'agressivité est le meilleur indice à utiliser dans le cas des tuyaux en amiante-ciment (AWWARF, 1989). On doit vérifier ces indices régulièrement et régler la qualité de l'eau en conséquence pour minimiser la corrosion interne.

4. CAS D'UTILISATION ET RESTRICTIONS

4.1 CAS D'UTILISATION

Les municipalités doivent donner immédiatement suite aux signalements de ruptures et aux plaintes. Elles doivent mettre en place des modes opératoires normalisés qui permettent de faire face à ce genre de situation.

Il faut procéder chaque année à l'évaluation préliminaire des données sur les ruptures de conduites de distribution, les plaintes, les pertes d'eau ainsi que l'échantillonnage et l'inspection périodiques pour être en mesure de déceler les tendances et la nécessité de procéder à des enquêtes plus approfondies.

Il faut procéder à une enquête approfondie lorsqu'une ou plusieurs des conditions qui suivent sont remplies :

- les évaluations préliminaires montrent un taux de ruptures et un débit de fuites excessifs, une capacité hydraulique inadéquate ou une mauvaise qualité de l'eau;
- l'analyse des risques permet de repérer les conduites de distribution essentielles qui présentent un potentiel élevé de dommages matériels importants, d'impact sur l'environnement ou de perte de service;
- la diligence raisonnable est nécessaire (p. ex. analyse de la défaillance d'une conduite de distribution essentielle);
- on veut soutenir la planification des immobilisations (p. ex. on propose une autre construction dans l'emprise de la route) et les programmes de gestion d'actifs;
- on veut procéder à l'essai pilote de nouvelles techniques dans le but d'appuyer la planification à long terme;
- on veut effectuer un travail opportuniste, comme par exemple lorsqu'une conduite de distribution d'eau est temporairement hors service.

4.2 RESTRICTIONS

Il existe certaines restrictions en ce qui a trait aux méthodes d'enquête approfondie dont on a donné les grandes lignes à l'article 3 :

- les petites municipalités ne possèdent habituellement pas les ressources nécessaires pour mener une enquête approfondie sur les réseaux de distribution d'eau;

- les techniques d'essais non destructifs et les méthodes de détection de fuites peuvent comporter diverses restrictions, telles que le matériau et le diamètre du tuyau, le coût, le niveau d'innovation technique, la quantité d'eau que contient la conduite soumise aux essais, l'accès au tuyau ainsi que la profondeur et l'emplacement de celui-ci.

4.3 RÉSULTATS PRÉVUS

- Un programme d'inspection stratégique permet de mieux comprendre l'état d'un réseau de distribution d'eau ainsi que les processus et les tendances de détérioration. Il devrait en résulter les avantages exposés à l'article 2.6.
- L'analyse des données sur l'état du réseau dans le cadre d'une évaluation aidera à garantir un niveau de service élevé de manière rentable et durable.

En mettant en œuvre un programme d'inspection stratégique, une entreprise de service public pourra éviter la diminution des niveaux de service, réduire les coûts d'exploitation et d'entretien, et minimiser les défaillances futures du réseau.

ANNEXE A : RAPPORT DE RUPTURE DE CONDUITE DE DISTRIBUTION

Généralités

Date et heure auxquelles on a signalé la fuite _____
 Heure à laquelle on a fermé l'eau _____
 Heure à laquelle on a ouvert l'eau _____
 Propriétés touchées _____
 Température de l'air _____
 Réparé par _____
 Dommages matériels _____

Emplacement

Adresse de la propriété la plus proche _____
 Distance de la ligne de propriété la plus proche _____
 Distance de l'intersection la plus proche _____
 Ordonnée et abscisse _____
 Manœuvre des robinets d'isolement _____

Caractéristiques physiques

Diamètre du tuyau _____
 Matériau du tuyau _____
 Année de pose _____
 Épaisseur de la paroi ou classe du tuyau _____
 Type de revêtement _____
 Type de joint _____
 Type de branchement d'eau _____
 Pression normale de fonctionnement _____
 Sous un boulevard ou une route _____
 Profondeur du couvercle _____
 Profondeur du gel _____
 Type de sol indigène _____
 Type de remblai _____
 Résistance du sol _____
 Prélèvement d'un échantillon du sol (Oui/Non) _____
 Prélèvement d'un échantillon du tuyau _____

Type de défaillance

Fissure circulaire
 Fissure longitudinale
 Emboîtement fendu
 Trou de piqûre de corrosion
 Fuite au niveau du joint
 Fuite au niveau du robinet
 Fuite au niveau du branchement d'eau
 Raccord brisée

Cause probable de la défaillance

Corrosion
 Sol gelé
 Défaillance au niveau du joint
 Dérangement (tiers)
 Haute pression
 Tuyau gelé

Type de réparation

Réparation de l'étrier
 Remplacement d'un tronçon du tuyau
 Remplacement du robinet
 Remplacement du branchement d'eau
 Pose d'une anode
 Réparation du joint

RÉFÉRENCES

AWWA, 1980. PVC Pipe – Design and Installation – Manual M23.

_____, 1985. Steel Pipe – A Guide for Design and Installation – Manual M11.

_____, 1987. External Corrosion – Introduction to Chemistry and Control – Manual M27.

_____, 1989. Distribution Network Analysis for Water Utilities – Manual M32.

_____, 1995. Concrete Pressure Pipe – Manual M9.

_____, 1996. Ductile Iron Pipe and Fittings – Manual M41.

AWWARF, 1987. Water Main Evaluation for Rehabilitation/Replacement.

_____, 1989. Economics of Internal Corrosion Control.

_____/ DVGW, 1986. Internal Corrosion of Water Distribution Systems.

Burn, L.S., 1998. An Analysis of Water Reticulation Pressure Fluctuations and their Effect on PVC Pipe. Transactions of the Institution of Engineers, Australia.

Duranceau, S. et G. Bell, 1995. Effects of Electrical Grounding on Pipe Integrity and Shock Hazard.

Kleiner, Y. et B. Rajani, 2001. Comprehensive Review of Structural Deterioration of Water Mains: Statistical Models.

Makar, J., 2001. Investigating Large Gray Cast Iron Pipe Failures: A Step By Step Approach.

Makar, J. et N. Chagnon, 1999. Inspecting Systems for Leaks, Pits and Corrosion.

Makar, J.M., R. Desnoyers et S.E. McDonald, 2001. Mieux comprendre le mécanisme de bris des conduites en fonte grise.

Male, J.W. et T.M. Walski, 1990. Water Distribution Systems – A Trouble Shooting Manual.

McNeill, L. et M. Edwards, 2001. Iron Pipe Corrosion in Distribution Systems.

NACE International, 1992. NACE Book of Standards – Volume 1, Standards and Recommended Practices, Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.

Peabody, A.W., 2001. Peabody's Control of Pipeline Corrosion (2nd Edition), National Association of Corrosion Engineers.

Rajani, B. et Y. Kleiner, 2001. Comprehensive Review of Structural Deterioration of Water Mains: Physically Based Models.

R.V. Anderson Associates Ltd. (RVA), 2002. Best Practice Scan – Potable Water PW2.

Ripp, K., 2000. Causes and Cures of Distribution System Corrosion.

Romer, A. et G. Bell, 2001. Causes of External Corrosion on Buried Water Mains.

Santé Canada, 1999. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada.