

# RÉHABILITATION D'UNE CONDUITE D'AQUEDUC DE 1800mm DE DIAMÈTRE À L'AIDE DE FIBRES DE CARBONE



***Serge Martin Paul, ing. M.ing.,***

*Chef de section*

***Philippe Leblanc, ing. PMP,***

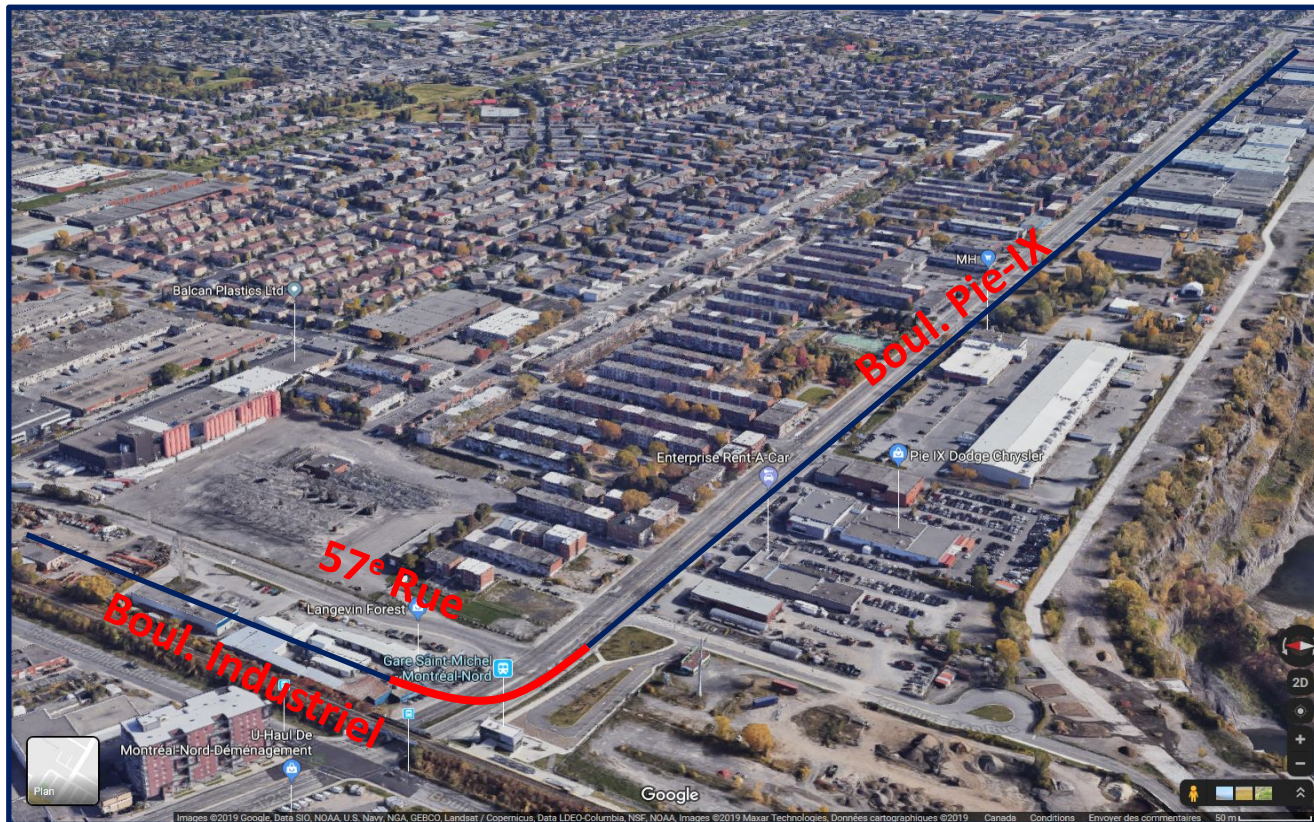
*Chargé de projet*

# Plan de la présentation

- Contexte
- Évaluation des pistes de solutions
- Marché de la fibre de carbone au Canada
- Conception du projet
- Réalisation des travaux
- Conclusion

# Contexte

## Localisation du projet



# Contexte

## Historique de la conduite

- ◉ Bris majeur survenu en août 2001
- ◉ Inspection électromagnétique en 2001 et 2007
- ◉ Surveillance acoustique en continue en 2008
- ◉ Détection de plusieurs tuyaux avec des câbles en train de briser grâce à la surveillance en continu et un système d'alerte par courriel
- ◉ Mise hors service de la conduite pour réaliser un projet en urgence
  - ◉ Réhabilitation de la conduite en insérant une conduite en acier de 1650 mm dans la conduite existante de la rue Jarry à la 57<sup>e</sup> Rue
  - ◉ **Une portion non réhabilitée entre la 57<sup>e</sup> Rue et le boulevard Industriel**

# Contexte

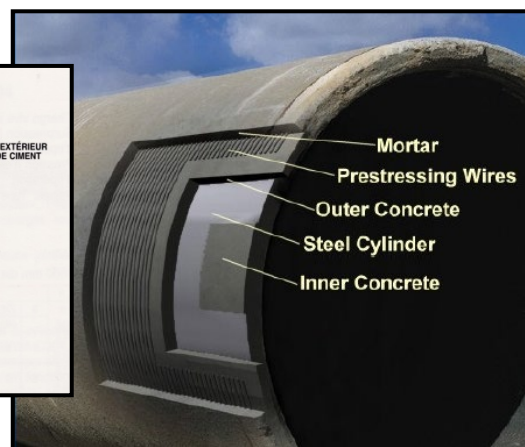
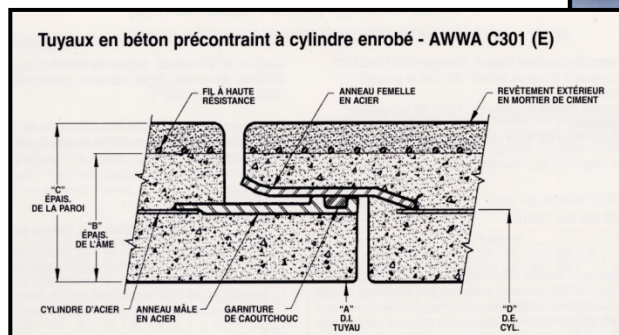
## Critères de priorisation du projet

- ◉ Mise en service du SRB Pie-IX
  - ◉ Éviter des bris pendant l'exploitation du SRB
  - ◉ Éviter des interventions avec des impacts majeurs
  - ◉ Réalisation des travaux en mode planifié
- ◉ La mise hors service impliquerait des baisses de pression considérable
- ◉ Projet de bouclage de l'est préalable à la fermeture de la conduite de 1800 mm

# Contexte

## Type de conduite

- ◉ Conduite de 1800 mm de diamètre
- ◉ Conduite en béton précontraint à cylindre d'acier enrobé de type AWWA C-301 (E) installée en 1974
- ◉ Conduite importante pour l'alimentation de l'est de l'île de Montréal



Source Forterra

# Contexte

## Sommaire du projet

- Réhabilitation sans tranchée
- Renforcement par fibre de carbone (PRFC)
- Conduite d'aqueduc principale 1800 mm - 85 m. lin.
- Réhabilitation d'une chambre de vannes
- Localisé dans l'axe du boulevard Pie-IX entre la 57<sup>e</sup> rue et le boul. Industriel
- Réalisé du mois d'avril au mois de juillet 2019

# Évaluation des solutions

## Étapes du projet

- ◉ Interventions préalables sur certaines chambres de vannes
- ◉ Auscultation électromagnétique à l'hiver 2019
- ◉ Élaboration du projet de réhabilitation
  - ◉ Choix de la méthode
  - ◉ Gestion des risques
- ◉ Conception et appel d'offres
- ◉ Réalisation des travaux.



The top half of the slide features a background image of a tunnel, likely for a water pipe, with a light source at the end creating a bright glow and reflections on the metallic walls.

# Évaluation des solutions

## Objectifs - options évaluées

### Objectifs:

consolider la conduite afin de prévenir les bris futurs tout en minimisant les impacts d'un chantier sur le milieu environnant, le tout, en assurant une remise en service rapide.

### Options évaluées

1. Remplacement complet et/ou partiel des tuyaux
2. Reconstruction de la précontrainte par l'extérieur
3. Réhabilitation par chemisage
4. Renforcement interne par fibre de carbone.
5. Insertion d'une nouvelle conduite dans la conduite existante (Acier, PRV ou autres)

# Évaluation des solutions

Critères d'analyse	Reconstruction Partielle /complète	Réhabilitation à l'aide de Fibre de carbone	Réhabilitation par insertion
Durée de vie projetée	100 ans	50 ans	100 ans
Impact sur la circulation	élevé	Moyen	Moyen
Complexité de réalisation	Moyen à élevé	Moyen	Moyen
Impact sur les activités des commerces adjacents	élevé	faible	faible
Risque de bris ou fuites au courant des 50 prochaines années	faible	Faible à moyen	faible
Durée des travaux	6 mois	3 mois	5 mois

# Solution retenue

La réhabilitation de la conduite par polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC) répond aux besoins et aux objectifs du projet en termes de:

- ◉ Coût
- ◉ Échéancier
- ◉ Impact sur la circulation
- ◉ Insertion du nouveau chantier dans le chantier du SRB Pie-IX

# Historique du PRFC

- ◉ Fin des années 80: début de l'utilisation en génie civil avec des essais en laboratoire dans le milieu universitaire
  - ◉ Début des années 90: utilisation très encadrée dans les bâtiments
  - ◉ Fin des années 90: début de l'utilisation pour renforcer des conduites en béton précontraint
  - ◉ Début des années 2000: meilleure précision dans les méthodes d'inspection et utilisation du PRFC par plusieurs municipalités
  - ◉ Plusieurs contrats publics aux USA
- Historique tiré de la norme AWWA C305-18
- ◉ 2009: Première utilisation à Montréal pour des conduites d'aqueduc

# Historique du PRFC

- ◉ Plusieurs projets réalisés à travers le monde -bonne pratiques mais aucune norme
- ◉ Difficultés en phase de conception
- ◉ Responsabilité de la conception laissé aux entrepreneurs puisque chaque produit est différent
- ◉ 2009 Formation d'un sous-comité au sein de l'AWWA pour développer une norme
- ◉ Décembre 2018 après 9 ans: parution de la norme AWWA C305-18

# Présentation du produit

## Constituants du matériau PRF

Fibres + Matrice = Composite

### 1. Fibre: Offre solidité et rigidité

Composée généralement de verre, de carbone ou d'aramide (kevlar)

### 2. Matrice (Polymère):

- Protège les fibres ;
- Transfère les charges aux fibres.

La matrice polymère consiste généralement d'époxy ou d'ester vinylique

# Propriétés du PRFC

- ◉ Système composé de la couche d'apprêt, de la fibre, de la résine, de la couche finale étanche.
- ◉ Les matériaux qui entrent dans la composition du système doivent être NSF
- ◉ Les fibres peuvent être unidirectionnelles ou multidirectionnelles - fibres utilisées pour les conduites sont unidirectionnelles avec une grande résistance dans le sens des fibres
- ◉ Haute résistance, haut module, faible densité
- ◉ Durabilité et caractéristiques de fatigue supérieures
- ◉ Utilisé dans des applications poids/module critiques
- ◉ Ne corrode pas
- ◉ Sensible aux variations de température

# Conception

- ⊙ Recherche de consultant pour effectuer la conception: sans succès
- ⊙ Plusieurs municipalités consultées pour des modèles de devis
- ⊙ Les coûts des projets varient beaucoup d'une municipalité à l'autre = estimation budgétaire difficile
- ⊙ Préparation d'un devis de performance = conception du système de PRFC transférée à l'entrepreneur



# Réalisation des travaux

Imprégnation et installation multicouches

- ⦿ Sens de pose opposé au sens d'écoulement de l'eau
- ⦿ Largeur d'une bande de fibre de carbone est de 600mm
- ⦿ Le système de fibres de carbone a une épaisseur moyenne de  $\pm 7,4$ mm (3 couches de fibres de carbone)

# Réalisation des travaux

- ◉ Travaux préparatoires d'accès à la conduite
- ◉ Méthodes et rendement des travaux
- ◉ Surveillance en résidence et contrôle qualitatif
- ◉ Travaux connexes
- ◉ Défis rencontrés

# Réalisation des travaux





# Réalisation des travaux

## Travaux préparatoires d'accès à la conduite

- ◉ Mobilisation, Entrave et maintien de la circulation
- ◉ Installations temporaires
- ◉ Info-Excavation, Excavation / Étançonnement, Caractérisations des sols et Disposition
- ◉ Enlèvement de la vanne et accès
- ◉ Ventilation / Contrôle de la température et de l'eau

# Réalisation des travaux - Travaux préparatoires d'accès

## Mobilisation, enlèvement de la vanne et accès



# Réalisation des travaux - Travaux préparatoires d'accès

## Ventilation/Contrôle - Température / Eau



# Réalisation des travaux

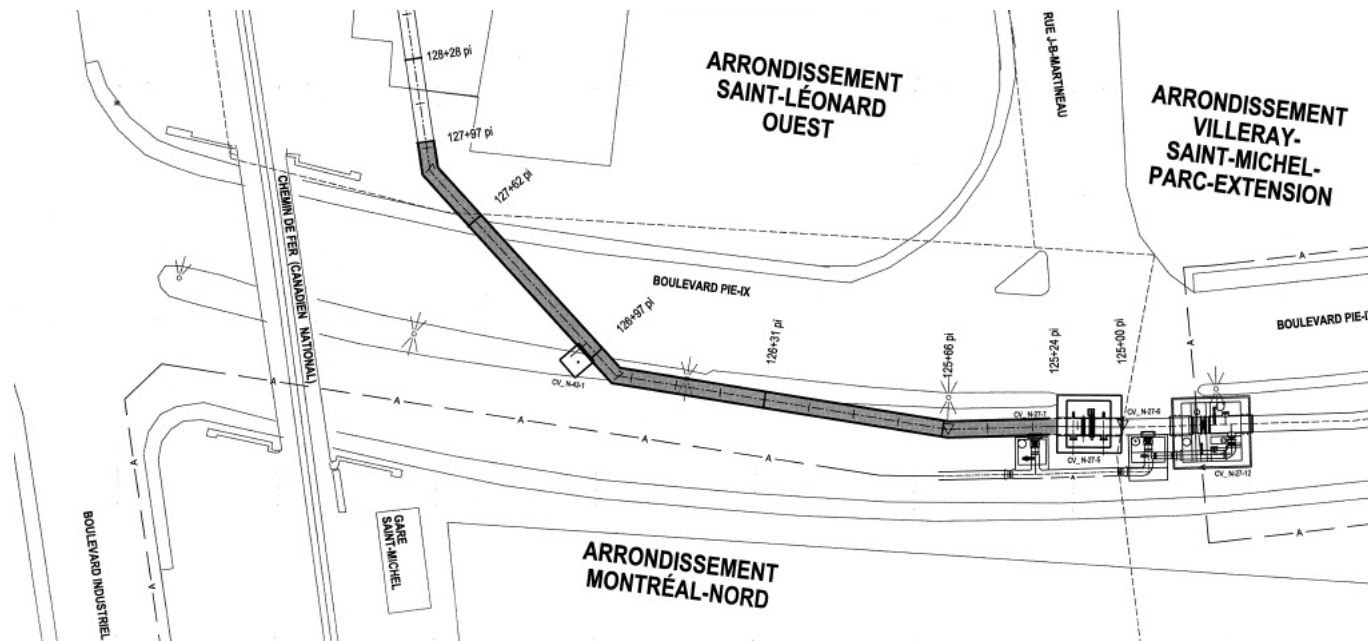
## Méthodes et rendement des travaux

- ◉ Validation des limites des travaux
- ◉ Nettoyage et préparation de la conduite d'accueil
- ◉ Préparation des terminaisons (extrémités et raccords)
- ◉ Imprégnation et installation multicouches de fibres de carbone
- ◉ Couches d'époxy finales

# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Validation des limites des travaux

(85m.lin planifiés vs 87,4m.lin réels)





# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Nettoyage et préparation de la conduite d'accueil

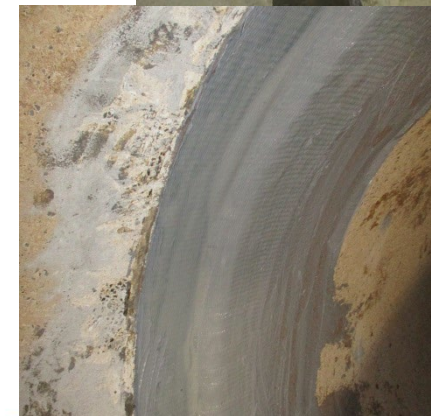
Nettoyage des surfaces, préparation de 22 joints et réparations mineures à l'aide de mortier de réparation modifié aux polymères



# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Préparation des terminaisons (extrémités et raccords)

- ◉ Retrait du mortier jusqu'à l'acier
  - ◉ Texturer l'acier par ponçage (CSP3-4)
  - ◉ Chanfrein de 45° au trait de scie avec pâte époxy
  - ◉ Mise en place de fibres de verre sur l'acier préparé
- préparé



# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Imprégnation et installation multicouches

- ◉ Application d'un apprêt sur le béton et entre les couches
- ◉ Imprégnation de la fibre de carbone in situ via un saturateur mécanique - longueur de la circonférence +150mm
- ◉ Temps de repos pour la fibre imprégnée
- ◉ Pose de la fibre imprégnée en évitant d'emprisonner de l'air
- ◉ Paramètres d'attente et / ou de préparation pour les couches subséquentes.
- ◉ Courbe d'apprentissage pour atteindre un rendement optimal entre 20 et 30 bandes par jours, pour environ 430 bandes (réalisée en  $\pm 20$  jours de travail)

# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

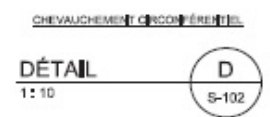
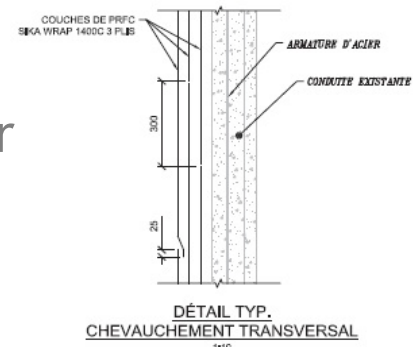
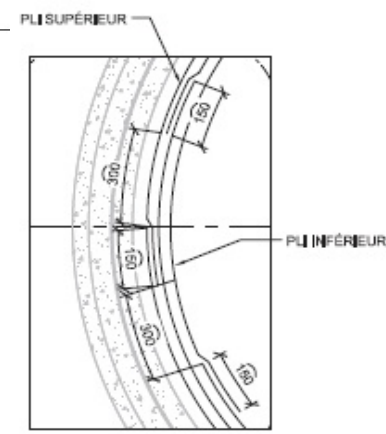
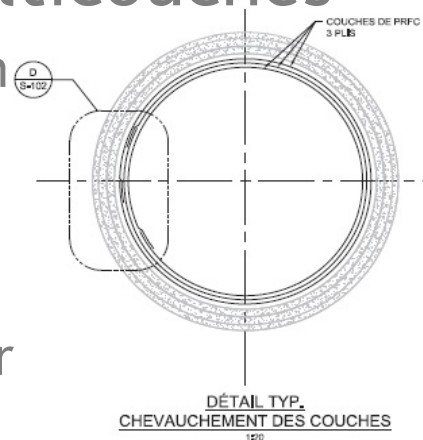
## Imprégnation et installation multicouches



# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Imprégnation et installation multicouches

- Replis de la fibre sur elle-même sur 150mm
- Aucun chevauchement d'une bande sur l'autre pour la première couche
- Chevauchement de 300mm d'une bande sur l'autre pour la 2<sup>e</sup> couche ainsi qu'un décalage de 300mm du replis
- Chevauchement de 50mm d'une bande sur l'autre pour la dernière couche ainsi qu'un décalage de 300mm du replis



# Réalisation des travaux - Méthodes et rendement

## Couches d'époxy finales

- ⦿ Scellement, protection contre l'usure, augmentation du coefficient Hazen-Williams et NSF61 (certification pour l'eau potable)



# Réalisation des travaux

## Surveillance en résidence et contrôle qualitatif

- ◉ La Ville de Montréal assure la surveillance en résidence
- ◉ Mesures quotidiennes d'humidité (%) et de température (ambient et substrat)
- ◉ Essais d'arrachement du substrat
- ◉ Essais d'arrachement du système PRFC
- ◉ Échantillonnage de fibres de carbone quotidiennement et essais du système en laboratoire (CDCQ)

# Réalisation des travaux - Surveillance et contrôle

## Mesures des taux d'humidité et température

- ◉ Mesures quotidiennes (appareils étalonnés)
- ◉ Paramètres observés :
  - ◉ Température ambiante et substrat : entre 10 et 35°C et doit être de 3°C supérieure au point de rosée
  - ◉ Humidité relative ambiante : < 85%
  - ◉ Humidité relative du substrat : 4% et moins
- ◉ Moyens : Ventilation d'air chaud en continu





# Réalisation des travaux - Surveillance et contrôle

## Essais d'arrachement du substrat

(ASTM D4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)

- Résistance espérée > 1,5MPa
- Résistance obtenue : < 1,5MPa (1,1 / 1,4 / 1,3 / etc.)



# Réalisation des travaux - Surveillance et contrôle

## Essais d'arrachement du système PRFC

(ASTM D4541 Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers)

○ Résistance obtenue :  $< 1,5\text{MPa}$ , dans le même ordre de grandeur que les essais d'arrachement du substrat



# Réalisation des travaux – Surveillance et contrôle

## Échantillonnage

- Échantillon complet du système (3 couches) au jour 1
- Échantillons au rythme de pose (1 couche / jour moy.)
- Surface d'échantillons de 300mm X 300mm
- Essais en laboratoire selon la norme ASTM D3039 *“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”*

# Réalisation des travaux – Surveillance et contrôle

## Échantillonnage



# Réalisation des travaux - Travaux connexes

## Nouvelle vanne et autres pièces



# Réalisation des travaux

## Défis rencontrés

- ⦿ Se mobiliser sur le chantier du SRB
- ⦿ L'inexpérience de l'équipe de pose sur ce type de projet
- ⦿ Mettre en œuvre le PRFC sur les différents types de raccords rencontrés
- ⦿ Poncer les imperfections laissées par les bulles d'air lors du retrait de la pellicule de protection

# Réalisation des travaux - Défis rencontrés

## Mettre en œuvre le PRFC sur les raccords

- ◉ Raccords de différents types :
  - ◉ Raccord d'origine (réalisés en usine)
  - ◉ Raccord en forme de goutte (ventouse)
  - ◉ Raccord de type fait en chantier



# Réalisation des travaux - Défis rencontrés

## ○ Ponçage des imperfections





# Conclusions

- Rétablissement de la capacité structurale de la conduite
- Respect de l'échéancier
- Beaucoup d'interrogation lors de la préparation des plans et devis
- Marché restreint et manque d'ingénieurs spécialisés dans la conception de système de PRFC pour conduite
- La publication de la nouvelle norme AWWA C305-18 vient encadrer la réhabilitation de conduites en béton par PRFC

# Questions

Questions ?

