



**Expertise sur l'état du béton et des barres
d'armature en PRFV du pont P-11591 situé
sur l'autoroute 20 est à Val-Alain**

**MATÉRIAUX
ET INFRASTRUCTURES**

**ÉTUDES ET RECHERCHES
EN TRANSPORT**

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

Rapport d'expertise

Demandé par :

M. Guy Tremblay, ing., M. Sc. A, directeur
Direction du laboratoire des chaussées
Ministère des Transports, de la Mobilité durable et
de l'Électrification des transports

Relevés et essais réalisés par :

Michaël Arsenault, t.t.p.
Dave Brindle, t.t.p.
Pascale Larouche, t.t.p.
Marc-Antoine Loranger, ing. jr
Claude Nazair, ing.
Secteur liants hydrocarbonés et chimie

Rapport rédigé par :

Marc-Antoine Loranger, ing. jr
Claude Nazair, ing.
Secteur béton
Service des matériaux d'infrastructures
Direction du laboratoire des chaussées
Ministère des Transports, de la Mobilité durable
et de l'Électrification des transports

N/Dossier SMI : MC-15-008/BC-15-095
Québec, le 18 janvier 2016

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

Collaborateurs

Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports*

Christine Duchesne, chimiste, M. Sc., Direction des matériaux d'infrastructures

Sébastien Galipeau, ing., Direction générale des structures

© Gouvernement du Québec, ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports, 2017
ISBN 978-2-550-78919-2 (PDF)

Dépôt légal – 2017

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés. La reproduction de ce document par procédé mécanique ou électronique, y compris la microreproduction, et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation écrite des Publications du Québec.

* Le ministère des Transports du Québec a changé de nom le 28 janvier 2016 et est devenu le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

FICHE ANALYTIQUE

Titre et sous-titre du rapport		Numéro du rapport MTMDET	
Expertise sur l'état du béton et des barres d'armature en PRFV du pont P-11591 situé sur l'autoroute 20 est à Val-Alain		RTQ-17-01	
		Date de publication du rapport (année-mois)	
		2017-06	
Titre du projet de recherche		Numéro du dossier	Numéro du projet
Expertise sur l'état du béton et des barres d'armature en PRFV du pont P-11591 situé sur l'autoroute 20 est à Val-Alain		MC-15-008/BC-15-095	Sans objet
Responsables de recherche		Date du début de la recherche	Date de fin de la recherche
Marc-Antoine Loranger et Claude Nazair		2015-07-13	2016-01-18
Auteurs du rapport			
Marc-Antoine Loranger et Claude Nazair			
Chargés de projet, direction		Coût total de l'étude	
Marc-Antoine Loranger Direction générale du laboratoire des chaussées Claude Nazair Direction générale du laboratoire des chaussées		15 000 \$	
Étude ou recherche réalisée par (nom et adresse de l'organisme)		Étude ou recherche financée par (nom et adresse de l'organisme)	
Direction des matériaux d'infrastructures – Secteur béton Direction générale du laboratoire des chaussées Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8		Direction des matériaux d'infrastructures – Secteur béton Direction générale du laboratoire des chaussées Ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports 2700, rue Einstein Québec (Québec) G1P 3W8	

Problématique

Le ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET) utilise des armatures en polymère renforcé de fibres (PRF) pour la construction des ponts depuis plus de 15 ans. Ces armatures ont l'avantage de ne pas être sensibles à la corrosion comparativement aux barres d'armature en acier conventionnel. Néanmoins, l'utilisation de barres d'armature en matériaux composites comporte encore aujourd'hui plusieurs inconnues, notamment en ce qui concerne la durabilité de celles-ci. Plusieurs études de vieillissement accélérées ont été réalisées par la communauté scientifique afin de prédire la durée de vie de ces barres. Toutefois, la durabilité des barres d'armature en PRF lorsqu'elles sont exposées aux conditions environnementales réelles demeure pour le moment peu documentée. À cet effet, une expertise a été réalisée par le ministère des Transports en juillet 2015 sur la structure P-11591 située sur l'autoroute 20 en direction est, à Val-Alain. Cette structure, où l'on trouve la présence d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) sur la totalité de la dalle mince et des glissières de sécurité, a été construite en 2004 et est bien documentée. Par conséquent, ce projet représentait le meilleur cas pour étudier la durabilité des barres d'armature en PRFV au MTMDET.

Objectifs

Ce rapport présente les résultats de l'étude de performance sur la durabilité des armatures en PRFV du pont P-11591 situé à Val-Alain. Au moment où l'expertise a été conduite, la structure avait 11 ans de vie depuis sa mise en service.

Méthodologie

Au total, trois carottes de béton ont été prélevées au niveau de la glissière de sécurité du côté sud-est du pont P-11591. Deux d'entre elles contenaient des barres d'armature en PRFV (5 barres d'armature en PRFV dans une et 3 barres d'armature en PRFV dans l'autre). Les 8 échantillons de PRFV ont par la suite été extraits de ces deux carottes de béton. Diverses techniques d'analyse ont été utilisées afin de déterminer les propriétés physico-chimiques et d'étudier la microstructure des échantillons de PRFV prélevés (spectrométrie à fluorescence X, spectroscopie IRTF, microscopie électronique à balayage, calorimétrie différentielle à balayage, spectroscopie RMN à l'état solide, etc.).

Plusieurs essais ont également été effectués sur le béton des carottes prélevées afin de mieux caractériser l'environnement adjacent aux barres d'armature en PRFV.

Résultats et recommandations

Les résultats de cette étude démontrent que les barres d'armature en PRFV du pont P-11591 ne présentent pas de signe de détérioration avancée après 11 ans de mise en service. Toutefois, les conclusions reposent seulement sur des analyses physico-chimiques des échantillons prélevés. À l'avenir, il serait important d'étudier le comportement mécanique à long terme des barres d'armature en PRFV de la structure, et ce, à l'aide de méthodes qui restent à expérimenter. De plus, il serait pertinent d'évaluer l'état de la structure et de ses constituants après 25 ans de mise en service, de manière à mieux prédire son comportement à long terme.

Mots clés

PRFV, polymères renforcés de fibres de verre, matériaux composites, barres d'armature, pont, glissière de sécurité, durabilité, conditions environnementales réelles, propriétés physico-chimiques.

Nombre de pages

103

Nombre de références bibliographiques

6

Langue du document

☒ Français

☐ Anglais

Autre (spécifier) :

TABLE DES MATIÈRES

1. Mandat	9
2. Mise en contexte.....	9
3. Localisation de la structure	11
4. Échantillons	11
4.1 Béton	11
4.2 PRFV	12
5. Protocoles d'essais.....	14
5.1 Protocole d'essais sur le béton	14
5.2 Protocole d'essais physico-chimiques sur PRFV.....	15
6. Résultats des essais et discussions.....	16
6.1 Essais sur le béton.....	16
6.1.1 Résistance à la compression.....	16
6.1.2 Teneur en ions chlorure	16
6.1.3 Absorption et vides d'air	17
6.1.4 Détermination des paramètres des vides dans le béton de ciment (L-Barre)	18
6.1.5 Perméabilité aux ions chlorure	18
6.1.6 Observations pétrographiques	18
6.2 Essais physico-chimiques sur PRFV	19
6.2.1 Surface effective	19
6.2.2 Densité.....	19
6.2.3 Absorption d'eau	20
6.2.4 Taux de cure	21
6.2.5 Température de transition vitreuse (T_g)	22
6.2.6 Taux de fibres	23
6.2.7 Porosité.....	23
6.2.8 Spectrométrie par fluorescence X (FRX)	25
6.2.9 FTIR.....	25
6.2.10 Spectroscopie RMN à l'état solide.....	27
6.2.11 Microscopie électronique à balayage (MEB/EDS)	29
7. Conclusion.....	37
8. Références	39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de localisation de la structure P-11591	11
Figure 2 : Localisation des carottes	12
Figure 3 : Échantillons de barres d'armature en PRFV provenant des carottes de béton C1 et C3	13
Figure 4 : Mécanisme de dégradation de barres d'armature en PRFV en solution alcaline	20
Figure 5 : Photos avant et après les essais de porosité des barres MC-15-008-1, MC-15-008-3 et MC-15-005-5.....	24
Figure 6 : FTIR de la barre droite MC-15-008-2.....	26
Figure 7 : FTIR de la barre courbe MC-15-008-4.....	27
Figure 8 : Spectres RMN 13C en phase solide des échantillons de barres en PRFV de la structure P-11591	28
Figure 9 : Image au MEB d'une vue générale de la coupe transversale de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe).....	30
Figure 10 : Fort grossissement au MEB des fibres de verre et de la matrice de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe) et spectre EDS des fibres de verre et de la matrice	31
Figure 11 : Interface béton-composite de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe)	33
Figure 12 : Vue générale au MEB de la barre MC-15-008-7 (barre droite).....	34
Figure 13 : Fort grossissement au MEB des fibres de verre et de la matrice de l'échantillon MC-15-008-7 (barre droite) et spectre EDS des fibres de verre et de la matrice	35
Figure 14 : Interface béton-composite de l'échantillon MC-15-008-7 (barre droite)	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Essais à réaliser sur les carottes de béton	14
Tableau 2 : Essais à réaliser sur les barres d'armature en PRFV	15
Tableau 3 : Caractéristiques du béton des glissières coulées en place.....	16
Tableau 4 : Résultats des essais d'absorption d'eau	21
Tableau 5 : Résultats des essais de taux de cure	21
Tableau 6 : Résultats des essais de température de transition vitreuse.....	22
Tableau 7 : Résultats des essais de taux de fibres	23
Tableau 8 : Composition chimique des fibres de verre (par FRX)	25

ANNEXES

ANNEXE A – PLANS DE CONSTRUCTION DE LA STRUCTURE P-11591 .	40
ANNEXE B – DESCRIPTION VISUELLE DES CAROTTES	45
ANNEXE C – SCHÉMA DE LOCALISATION DES CAROTTES	49
ANNEXE D – CERTIFICAT DE CONFORMITÉ DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV...	51
ANNEXE E – FORMULE DE MÉLANGE ET CARACTÉRISTIQUE DU BÉTON.....	53
ANNEXE F – RAPPORT EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE	68
ANNEXE G – RÉSULTATS DES ESSAIS	79
ANNEXE H – RAPPORT D'ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉSONANCE MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE DU ¹³ C EN PHASE SOLIDE	95
ANNEXE I – PHOTOGRAPHIES MEB	100

1. MANDAT

Une expertise sur l'état des barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) du pont P-11591, situé sur l'autoroute 20 est dans la municipalité de Val-Alain, a été réalisée par l'équipe technique du Secteur béton du Service des matériaux d'infrastructures (SMI) à la demande de M. Guy Tremblay, directeur du laboratoire des chaussées. Cette structure a été construite en 2004.

Ce mandat consiste à évaluer les propriétés physico-chimiques des barres d'armature en PRFV présentes dans la glissière de sécurité orientée du côté sud-est du pont P-11591 (plans de la structure disponibles à l'annexe A). Le béton en place dans cette partie de l'ouvrage a également été caractérisé afin d'en évaluer sa durabilité. Pour ce faire, l'équipe technique du SMI a réalisé le 13 juillet 2015 une inspection sommaire de l'état de surface de la glissière de sécurité, en plus de prélever trois carottes de béton, soit deux carottes contenant des barres d'armature en PRFV de même qu'une carotte de béton sain. Cette expertise a été effectuée en collaboration avec la Direction des structures (DS). À cet effet, M. Sébastien Galipeau, ing. à la DS, était présent lors du prélèvement des carottes de béton.

2. MISE EN CONTEXTE

L'utilisation de matériaux composites au sein d'ouvrages d'art est encore relativement récente au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports (MTMDET). Selon l'information disponible, il appert que le premier projet du MTMDET incorporant de l'armature composite en PRFV a eu lieu en 1992 au niveau de la portion médiane (côté aval) des glissières de sécurité du pont Médéric-Martin (P-15641).

À cet effet, l'équipe technique du secteur béton du SMI a procédé, le 31 octobre 2013, à une inspection sommaire de l'état de surface des glissières de sécurité du pont Médéric-Martin en plus de prélever quelques carottes de béton contenant des échantillons de barres d'armature en PRFV. Une étude exhaustive sur l'état de vieillissement des barres d'armature en PRFV a par la suite été effectuée par le SMI. L'étude conclut que les échantillons prélevés présentaient plusieurs signes de détérioration tels que la présence de fissurations, de décollement au niveau de l'interface fibres-matrice et des fibres de verre endommagées. Toutefois, il faut noter que les procédés de fabrication de même que les constituants des PRFV ont considérablement évolué depuis 1992, notamment pour ce qui est de la résine polymère. Des analyses réalisées par spectroscopie RMN au début de l'année 2015 ont permis de déterminer que la matrice polymère des armatures composites du pont

Médéric-Martin était à base de polyester. À notre connaissance, le MTMDET spécifie depuis le début des années 2000 l'utilisation d'une résine à base de vinylester pour des raisons de durabilité. En effet, plusieurs études ont démontré que les PRFV à base de résine polyester sont nettement moins durables que les PRFV à base de résine vinylester.

À la suite des conclusions de l'étude réalisée par le SMI sur les armatures en PRFV du pont Médéric-Martin (N/Dossier SMI : MC-14-013/BC-13-118), la Direction du laboratoire des chaussées et la Direction des structures ont jugé opportun de reconduire une nouvelle étude, mais cette fois-ci sur des armatures en PRFV à base de vinylester. À cet effet, la structure P-11591 située sur l'autoroute 20 est, à Val-Alain, représentait un cas idéal pour les raisons suivantes :

- 1) premier tablier de pont en béton au Canada entièrement renforcé de barres d'armature en PRFV (Benmokrane, El-Salakawy, El-Gamal, & Goulet, 2007);
- 2) glissières de sécurité du pont également entièrement renforcées de barres d'armature en PRFV;
- 3) matrice polymère à base de vinylester pour l'ensemble des barres d'armature en PRFV de la structure;
- 4) structure très bien documentée et réalisation du projet en collaboration avec le milieu de recherche universitaire (Université de Sherbrooke);
- 5) projet le plus ancien dont les échantillons d'origine sont toujours disponibles pour analyses en laboratoire;
- 6) opportunité intéressante d'étudier l'état des barres d'armature en PRFV après 11 ans de mise en service et d'en comparer les résultats avec des échantillons « référence » prélevés en 2004 par le SMI lors de la construction de la structure.

3. LOCALISATION DE LA STRUCTURE

Le pont P-11591 est situé sur l'autoroute 20 est au-dessus de la rivière Henri dans la municipalité de Val-Alain (voir figure 1). Il s'agit d'un pont à poutres en acier construit en 2004 et muni de deux voies de circulation. La structure a une longueur totale de 57,6 m et une largeur totale de 12,6 m. Le débit de circulation journalier moyen annuel (DJMA) est de 24 200 véhicules, dont près de 25 % sont des camions (Transports Québec, 2014).

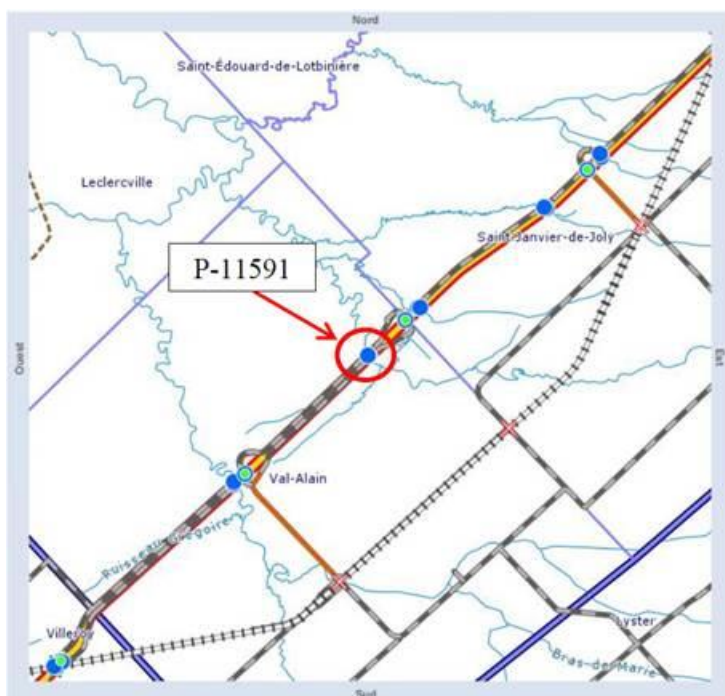


Figure 1 – Plan de localisation de la structure P-11591

4. ÉCHANTILLONS

4.1 Béton

Au total, trois carottes (C1, C2 et C3) ont été prélevées au niveau de la glissière du côté sud-est du pont P-11591 et les fiches de description visuelle de celles-ci se trouvent à l'annexe B. Le plan de localisation des carottes se trouve quant à lui à l'annexe C.

À noter que les carottes C1 et C3 avaient un diamètre de 150 mm, et la carotte C2, de 100 mm. Les carottes C1 et C3 ont été volontairement prélevées à des endroits où des fissures verticales étaient visibles à la surface de la glissière et où des barres d'armature en PRFV avaient été localisées initialement à l'aide d'un géoradar de modèle Hilti PS 1000 (voir figure 2).

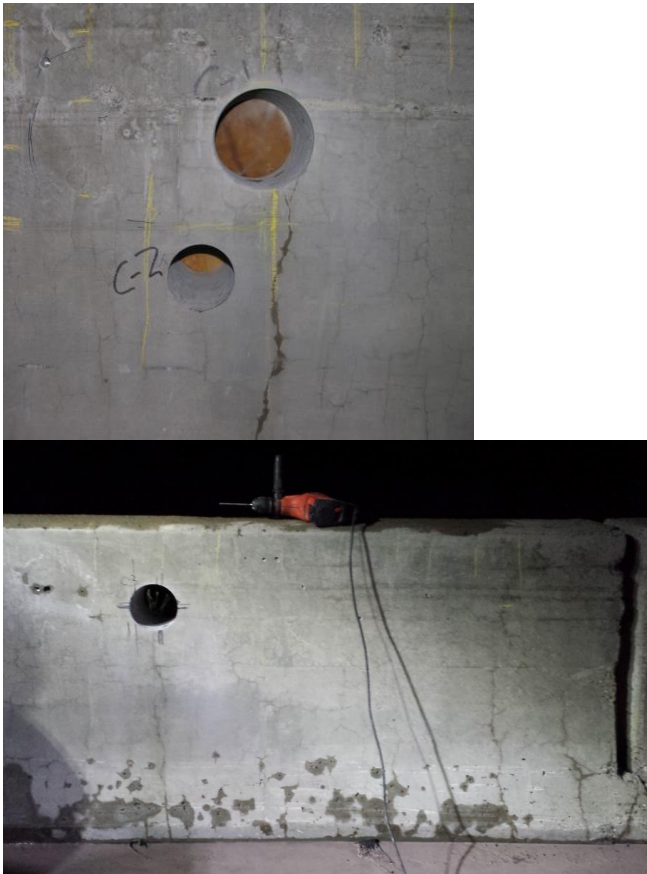


Figure 2 – Localisation des carottes

La carotte C1 contenait cinq barres d'armature en PRFV tandis que la carotte C3 en contenait trois.

4.2 PRFV

Les barres d'armature en PRFV ont été fabriquées par l'entreprise Pultrall inc., localisée à Thetford Mines. Le certificat de conformité des barres d'armature se trouve à l'annexe D. On trouve dans cet ouvrage deux types de barres, soit les barres droites (longitudinales # 5) et les barres courbes (verticales # 5 et # 6). Les recouvrements théoriques des barres d'armature en PRFV sont de

75 mm. Les recouvrements mesurés à partir des carottes de béton sont de 65 mm pour la carotte C1 et de 70 mm pour la carotte C3.

Des essais physico-chimiques ont été réalisés sur les échantillons MC-15-008-1 à MC-15-008-7 (voir figure 3). Les échantillons MC-15-008-1 à MC-15-008-5 provenaient de la carotte de béton C1. Les échantillons MC-15-008-6 et MC-15-008-7 provenaient quant à eux de la carotte de béton C3. Un échantillon supplémentaire (MC-15-008-8) contenu dans la carotte de béton C3 a été conservé pour référence future. Le détail des armatures prélevées (types de barres et diamètres) est disponible à l'annexe B.

La figure 3 permet de constater visuellement une différence de couleur entre les barres droites (grisâtre) et les barres courbes (verdâtre). De plus, la quantité de grains de sable constatée sur les barres courbes au niveau de l'enrobage est nettement inférieure à celle des barres droites.



Figure 3 – Échantillons de barres d'armature en PRFV provenant des carottes de béton C1 et C3

5. PROTOCOLES D'ESSAIS

5.1 Protocole d'essais sur le béton

En ce qui a trait aux carottes de béton prélevées, les essais ont été réalisés selon les normes suivantes :

- Résistance à la compression de carottes de béton CAN/CSA A23.2-14C
- Absorption et vides perméables dans le béton durci ASTM C 642
- Perméabilité aux ions chlorure ASTM C 1202
- Teneur en ions chlorure soluble à l'acide (totaux) AASHTO T-260
- Distribution du réseau de bulles d'air (L-Barre) ASTM C457
- Analyse pétrographique CSA A23.2-15A
ASTM C295

Le tableau 1 ci-contre résume les essais effectués sur chacune des trois carottes prélevées.

Tableau 1: Essais à réaliser sur les carottes de béton

	C1	C2	C3
Résistance à la compression		✓	
Absorption et vides d'air	✓		✓
Perméabilité aux ions chlorure	✓	✓	✓
Teneur en ions chlorure	✓	✓	✓
L-Barre	✓		
Analyse pétrographique	✓		

5.2 Protocole d'essais physico-chimiques sur PRFV

Le tableau 2 résume les essais physico-chimiques réalisés sur les barres d'armature en PRFV contenues dans les carottes de béton prélevées.

Les essais physico-chimiques ont été réalisés selon les normes suivantes :

- Surface effective ACI 440.3R, méthode B.1
- Densité ASTM D792
- Absorption d'eau ASTM D570
- Température de transition vitreuse ASTM D3418
- Taux de cure CSA S807-10
- Taux de fibres ASTM D2584
- Porosité ASTM D5117
- Spectroscopie FTIR, méthode SMI
- Spectrométrie FRX LC 31-305
- MEB/EDS*

* L'observation d'échantillons sous microscopie électronique à balayage (MEB) couplé à un système « energy dispersive X-ray spectrometry » (EDX ou EDS) ne fait référence à aucune norme. Les observations ont été réalisées au Laboratoire de microanalyse du département de géologie et de génie géologique de l'Université Laval.

Tableau 2 : Essais à réaliser sur les barres d'armature en PRFV

	Types de barres	φ	Carotte de béton	Densité	Absorp. eau	Tg	Taux de cure	Taux de fibres	Taux de vides	FTIR	RMN	FRX	MEB
MC-15-008-1	Courbe	#6	C1			✓	✓	✓	✓			✓	
MC-15-008-2	Droite	#5	C1	✓	✓			✓		✓		✓	
MC-15-008-3	Droite	#5	C1			✓	✓		✓				
MC-15-008-4	Courbe	#5	C1	✓	✓			✓		✓		✓	
MC-15-008-5	Courbe	#5	C1			✓	✓		✓				
MC-15-008-6	Courbe	#6	C3	✓	✓						✓		✓
MC-15-008-7	Droite	#5	C3			✓	✓	✓			✓	✓	✓
MC-15-008-8	Droite	#5	C3	Échantillon supplémentaire pour référence future									

6. RÉSULTATS DES ESSAIS ET DISCUSSIONS

6.1 Essais sur le béton

Un mélange typique de béton pour ouvrages d'art a été utilisé pour les glissières coulées en place de la structure P-11591. Ce mélange répondait aux caractéristiques d'un béton à haute performance de type XIII comme spécifié par la norme 3101 du *Tome VII – Matériaux* du ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports. Le tableau 3 présente les principales caractéristiques de ce mélange. De plus, la formule de mélange et les caractéristiques du béton d'origine sont disponibles pour référence à l'annexe E.

Tableau 3 : Caractéristiques du béton des glissières coulées en place

Résistance @ 28 jours (MPa)	Calibre des granulats (mm)	Dosage en liant GUb-SF (kg/m ³)	Ratio eau/liant	Affaissement (mm)	Teneur en air (%)
50	5-14	410	0,38	170 ± 30	5-8

6.1.1 Résistance à la compression

Cet essai est une caractéristique fondamentale du béton. Un essai de résistance à la compression a été réalisé sur la carotte C2. Préalablement à l'essai, l'échantillon fut conditionné par immersion pendant 40 à 48 heures comme exigé par la norme CAN/CSA A23.2-14C puisque les glissières de béton de la structure P-11591 sont exposées à l'humidité.

La résistance à la compression obtenue sur la carotte C2 est de 59,9 MPa. Ainsi, la résistance à la compression du béton des glissières de sécurité de la structure P-11591 est conforme aux caractéristiques prévues et est comparable aux valeurs mesurées en 2004 (voir annexe E). En effet, la valeur dépasse largement la résistance minimale de 50 MPa exigée à l'époque du bétonnage de la structure en 2004.

6.1.2 Teneur en ions chlorure

Les glissières de sécurité d'ouvrages d'art sont des éléments particulièrement exposés aux ions chlorure, et ce, pour plusieurs raisons. D'une part, elles sont constamment soumises aux chlorures provenant des éclaboussures de sels de déglacage à la suite de passages répétés de véhicules routiers et des opérations de déneigement. D'autre part, les glissières ne sont généralement pas hydrofugées à l'aide d'enduits ou de membranes imperméabilisantes, ce qui laisse donc la voie libre à la migration d'ions chlorure au sein du béton.

Il est reconnu que les ions chlorure favorisent la corrosion des barres d'armature en acier. Toutefois, dans le cas des barres d'armature en PRFV, il est admis par le milieu scientifique et industriel que celles-ci ne sont pas affectées par les chlorures provenant des sels de déglacage en raison de leur nature non métallique. Malgré tout, des teneurs en ions chlorure ont été réalisées sur les trois carottes prélevées dans le cadre de cette expertise afin de documenter les caractéristiques du béton. Le prélèvement de la poudre de béton pour ces essais s'est effectué dans le sens longitudinal des carottes. Pour les carottes C1 et C3, celles-ci ont été prélevées dans des plans de fissuration verticale apparents à la surface des glissières exposées au trafic (voir annexe B). Pour la carotte C2, les teneurs en ions chlorure ont été mesurées du côté non exposé des glissières à titre comparatif.

Pour la carotte C1, la teneur en ions chlorure varie de 0,60 % (dans les premiers 12,5 mm) à 0,039 % (entre 25 et 50 mm). Dans le cas de la carotte C2, la teneur en ions chlorure varie de 0,33 % (dans les premiers 12,5 mm) à 0,028 % (entre 25 et 38 mm). Quant à la carotte C3, la teneur en ions chlorure varie de 0,38 % (dans les premiers 12,5 mm) à 0,021 % (entre 25 et 50 mm). Les analyses effectuées permettent de constater que les teneurs en ions chlorure sont légèrement plus élevées dans la carotte C1, ce qui pourrait s'expliquer par la présence d'un plan de fissuration plus important à cet endroit.

6.1.3 Absorption et vides d'air

L'essai d'absorption est un indicateur de l'absorption et de la perméabilité du béton. Les valeurs obtenues sont, entre autres choses, des indicateurs du rapport eau/liant du mélange de béton, et par le fait même de la qualité de celui-ci. L'essai est réalisé selon les normes CAN/CSA A23.2-11C et ASTM C 642. L'article 11 de la norme CAN/CSA A23.2-11C évoque une précision de 0,5 % pour l'absorption, de 1 % pour les vides perméables ainsi que de 20 kg/m³ pour la masse volumique.

Les résultats d'absorption après immersion des carottes C1 et C3 sont respectivement de 5,0 % et de 4,0 %. Selon le Manuel d'entretien des structures, un béton ayant un taux inférieur à 6,5 % est jugé de « qualité acceptable ». Le béton utilisé dans le cadre des glissières du pont de Val-Alain est bien en deçà de la limite acceptable et est par conséquent de qualité adéquate du point de vue de ce critère. Quant au volume des vides perméables, il est de 12,1 % pour la carotte C1 et de 9,7 % pour la carotte C3. Par expérience, ces valeurs peuvent être considérées comme étant satisfaisantes.

Avec la méthode d'essai CSA A23.2-11C, il a aussi été possible d'évaluer la masse volumique du béton à surface saturée sèche (SSS). À noter que les masses volumiques SSS obtenues sur les carottes C1 et C3 permettent d'approximer la masse volumique du béton frais. La masse volumique SSS obtenue pour la carotte C1 fut de 2348 kg/m³ comparativement à 2459 kg/m³ pour la carotte C3. Ces valeurs sont conformes aux types de béton recherché

pour les ouvrages d'art du MTMDET et indiquent un respect des dosages théoriques minimaux des différents ingrédients lors de la mise en place du béton (voir annexe E).

6.1.4 Détermination des paramètres des vides dans le béton de ciment (L-Barre)

Une distribution du réseau de bulles d'air adéquate est une caractéristique essentielle pour assurer une bonne durabilité d'un béton. Les exigences actuelles du CCDG, du Tome VII et de la norme CSA A23.1 spécifient qu'aucun résultat individuel ne doit être supérieur à 260 μm et que la moyenne du facteur d'espacement ne doit pas être supérieure à 230 μm . Toutefois, le *Tome VII – Matériaux* du MTMDET mentionne que dans le cas d'un béton de type XIII, le facteur d'espacement peut être supérieur à 230 μm à la sortie de la pompe pourvu qu'il soit inférieur ou égal à 325 μm . De plus, la teneur en air du béton durci doit être supérieure ou égale à 3,0 %.

L'essai a été réalisé sur une plaquette rectangulaire prélevée dans le sens transversal de la carotte C1, donc selon le sens de la mise en place du béton lors de la coulée. Le facteur d'espacement obtenu est de 307 μm , tandis que la teneur en air du béton durci est 5,9 %. À partir de l'information obtenue, les glissières du pont ont été coulées avec un mélange de béton de type XIII pompé. Par conséquent, le facteur d'espacement est conforme aux exigences actuelles du Tome VII du MTMDET puisqu'il est en deçà de 325 μm .

6.1.5 Perméabilité aux ions chlorure

La perméabilité aux ions chlorure est un essai qui permet de quantifier la performance d'un béton en ce qui a trait à la résistance à la pénétration des ions chlorure. Des essais de perméabilité aux ions chlorure ont été réalisés sur les carottes de béton C1, C2 et C3. Les résultats des essais varient de 266 à 664 coulombs, ce qui équivaut à un indice de perméabilité très faible selon la classification en vigueur dans la norme d'essai ASTM C 1202. Le béton des glissières de la structure P-11591 se conforme donc à l'exigence actuelle de 1000 coulombs de la norme 3101 du tome VII.

6.1.6 Observations pétrographiques

Une expertise a été réalisée par Englobe pour le compte du MTMDET afin de déterminer la nature pétrographique des granulats présents dans la carotte de béton C1. Le rapport détaillé des observations pétrographiques se retrouve à l'annexe F. Les conclusions suivantes ont été obtenues :

- Les granulats grossiers de la carotte de béton C1 se composent de particules concassées de basalte vert et rouge.
- Le granulats fin de la carotte de béton C1 se compose d'un sable de nature quartzo-feldspathique.
- Le béton de la carotte C1 ne présente aucun indice de détérioration.

Selon les informations obtenues par la Direction territoriale de Chaudière-Appalaches la source de gros granulats provenait de la carrière Ray-Car et le sable de la gravière de Beauce (voir annexe E).

6.2 Essais physico-chimiques sur PRFV

Les résultats des sections 6.2.1 à 6.2.9 sont présentés de façon synthétisée au sein des rapports CI-028-15, CI-115-15, CI-116-15 et CI-115-17 se retrouvant à l'annexe G.

Pour les barres d'armature droites des glissières de la structure P-11591, les résultats sont comparés à ceux obtenus sur les barres droites dites de « référence ». Les barres droites « référence » ont été entreposées au SMI depuis 2004, mais aucun essai physico-chimique n'avait été réalisé sur celles-ci avant 2015. Ces barres ont le même diamètre que les barres prélevées de la structure P-11591 et sont issues du même lot de fabrication. Les résultats complets des essais physico-chimiques des barres droites « référence » sont disponibles à l'annexe G au sein du rapport CI-028-15 (numéro des échantillons : MC -15-001). Il est important de noter qu'aucun cadre normatif n'existait au moment de la fabrication des barres d'armature en PRFV utilisées dans la structure, bien que des guides sur ce type de matériau étaient disponibles (ACI 440.3R-04 et ISIS Canada Research Network). Conséquemment, la comparaison des résultats avec les exigences de la norme CSA S807-10 *Specification for fibre-reinforced polymers* n'est qu'à titre indicatif. En ce qui concerne les résultats des barres d'armature courbes des glissières de la structure P 11591, ceux-ci n'ont pu être comparés à des barres courbes « référence », faute d'échantillons disponibles.

6.2.1 Surface effective

La surface effective des barres droites « référence » est de 201,51 mm². Ce résultat correspond à la moyenne obtenue sur trois échantillons de 200 mm de longueur. En comparaison, la surface effective nominale des barres droites « référence » est de 197,93 mm².

Aucun résultat de surface effective n'est disponible pour les barres d'armature droites et courbes de la structure P-11591 puisque les longueurs des échantillons prélevées n'étaient pas suffisantes.

6.2.2 Densité

La masse volumique moyenne des échantillons de barres droites de la structure P-11591 de même que des barres droites « référence » est de 2,05 g/mL. La masse volumique moyenne des échantillons de barres courbes de la structure P-11591 est de 1,86 g/mL. La masse volumique des barres droites est donc supérieure aux barres courbes, ce qui s'explique par la teneur en fibre plus élevée dans le cas des barres droites (densité des fibres de verre plus grande que la densité de la matrice polymère).

6.2.3 Absorption d'eau

Le béton est un matériau relativement perméable à l'eau et est constitué d'une matrice interstitielle poreuse fortement alcaline. Le réseau poreux du béton influence le taux de diffusion des ions alcalins. Il est bien connu que l'exposition de barres d'armature en PRFV à l'eau et à une solution alcaline engendre une détérioration à long terme du matériau (Nishizaki & Meiarashi, 2002). Conséquemment, une barre de PRFV avec une absorption d'eau élevée risque d'avoir une dégradation accélérée dans le temps par rapport à une barre avec une plus faible absorption d'eau. Le mécanisme de dégradation typique des barres en PRFV en présence d'un milieu alcalin est illustré à la figure 4 (Won & et coll., 2008).

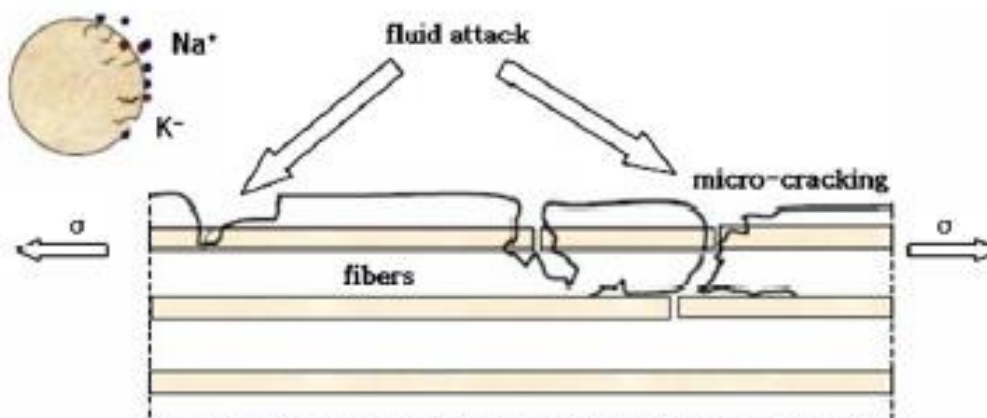


Figure 4 – Mécanisme de dégradation de barres d'armature en PRFV en solution alcaline

Essentiellement, lorsqu'une barre de PRFV est immergée en solution aqueuse et/ou alcaline, les ions alcalins et les molécules d'eau attaquent la matrice polymère lorsqu'ils sont absorbés par celle-ci, ce qui engendre de la délamination et de la fissuration dans la matrice du composite. Une réaction en chaîne s'ensuit. Il se crée alors un réseau poreux au sein du composite, laissant la voie libre à l'eau et aux agents chimiques, ce qui accélère de surcroît la dégradation du composite. Les pores ainsi créés permettent à l'eau et aux agents chimiques d'atteindre les fibres de verre. À partir de ce moment, les fibres de verre sont lessivées (par hydrolyse) ou endommagées (fissuration). Il s'en suit une forme de « corrosion » des fibres de verre non pas par un processus électrochimique comme pour l'acier, mais plutôt par une réaction d'hydrolyse des fibres causant alors des pertes au niveau de leur section transversale (Nishizaki & Meiarashi, 2002). Les performances mécaniques s'en trouvent donc affectées.

Les résultats d'absorption d'eau des échantillons provenant de la structure P-11591 de même que ceux des échantillons « référence » sont présentés au tableau 4. Les résultats correspondent à la moyenne d'un triplicata d'échantillons pour chaque barre.

Tableau 4 : Résultats des essais d'absorption d'eau

Échantillons	Types de barres	Absorption d'eau (%)
MC-15-008-2	Droite	0,14
MC-15-008-4	Courbe	0,08
MC-15-008-6	Courbe	0,14
MC-15-001	Droite « référence »	0,06

Les résultats d'absorption d'eau obtenus sur les échantillons de barres droites (MC-15-008-2) sont légèrement plus élevés que les résultats des échantillons de barres droites « référence » (MC-15-001).

À titre indicatif, les résultats d'absorption d'eau des barres droites (MC-15-008-2) et des barres courbes (MC-15-008-6) sont en deçà de la limite acceptable fixée par la norme CSA S807-10, soit $\leq 0,25$ % pour des barres classées D1 (haute durabilité).

En résumé, les résultats d'absorption d'eau obtenus sur les barres droites et courbes de la structure P-11591 sont faibles.

6.2.4 Taux de cure

Les résultats de taux de cure des échantillons provenant de la structure P-11591 ainsi que ceux des échantillons « référence » sont présentés au tableau 5.

Tableau 5 : Résultats des essais de taux de cure

Échantillons	Types de barres	Taux de cure* (%)
MC-15-008-1	Courbe	95,1
MC-15-008-3	Droite	97,8
MC-15-008-5	Courbe	Entre 91,5 et 97,0
MC-15-008-7	Droite	95,7
MC-15-001	Droite « référence »	96,8

* Les valeurs de taux de cure obtenues par DSC (*Differential scanning calorimetry*) sont calculées à partir d'une enthalpie de polymérisation de la résine pure de 239 J/g pour les barres courbes et de 257 J/g pour les barres droites, soit les valeurs correspondant aux résines utilisées par Pultrall de nos jours. Ces valeurs sont utilisées pour les calculs faute de connaître les enthalpies de polymérisation des barres fabriquées pour la structure P-11591.

En ce qui concerne les échantillons de barres droites MC-15-008-3 et MC-15-008-7, aucune différence notable des valeurs de taux de cure n'est observable comparativement aux valeurs obtenues sur les échantillons de barres droites « référence » (MC-15-001).

Pour les échantillons de barres courbes MC-15-008-1 et MC-15-008-5, des courbes irrégulières ont été obtenues au DSC (*Differential scanning calorimetry*) pour des raisons qui n'ont pu être expliquées. Les essais ont été répétés plus d'une fois, mais ils se sont avérés peu concluants. Conséquemment, les valeurs de taux de cure présentent des variabilités importantes.

Trois échantillons sur quatre respecteraient l'exigence actuelle de la norme CSA S807-10, soit un taux de cure minimal de 95 % pour des barres classées D1 (haute durabilité).

6.2.5 Température de transition vitreuse (T_g)

Une baisse notable de la température de transition vitreuse d'un matériau composite est généralement attribuable à une dégradation chimique du matériau ou à une certaine plastification (ramollissement) de la résine causée par la présence d'humidité dans la matrice (les atomes des molécules d'eau rompent des liens moléculaires du polymère) (Benmokrane, Ali, Mohamed, Robert, & ElSafty, 2015) (Mufti, Onefrei, & et coll., 2007).

Les résultats des températures de transition vitreuse des échantillons provenant de la structure P-11591 ainsi que ceux des échantillons « référence » sont présentés au tableau 6.

Tableau 6 : Résultats des essais de température de transition vitreuse

Échantillons	Types de barres	T_g^* (°C)
MC-15-008-1	Courbe	91
MC-15-008-3	Droite	120
MC-15-008-5	Courbe	Entre 84 et 106
MC-15-008-7	Droite	111
MC-15-001	Droite « référence »	117

* Les températures de transition vitreuse sont obtenues par DSC (*Differential scanning calorimetry*) et sont calculées à mi-hauteur.

Les courbes de calorimétrie utilisées pour déterminer le taux de cure servent également à déterminer la température de transition vitreuse. Ainsi, les températures de transition vitreuse des échantillons de barres courbes MC-15-008-3 et MC-15-008-5 présentent des variabilités importantes dues encore une fois aux courbes irrégulières obtenues par DSC. Les faibles valeurs de température de transition vitreuse obtenues sur les barres courbes sont probablement attribuables aux procédés de fabrication de ce type de barres.

Pour ce qui est des échantillons de barres droites MC-15-008-3 et MC-15-008-7, aucune baisse substantielle des températures de transition vitreuse n'est observable par rapport aux températures de transition vitreuse obtenues pour les échantillons de barres droites « référence » (MC-15-001).

La norme CSA S807-10 exige une température de transition vitreuse minimale de 100 °C pour des barres classées D1 (haute durabilité). En ce sens, seules les barres droites satisferaient les exigences actuelles.

6.2.6 Taux de fibres

Les performances mécaniques des barres d'armature en PRFV sont largement imputables aux fibres de verre qui jouent un rôle de renfort au sein du composite, la matrice polymère jouant quant à elle un rôle plus marqué en ce qui concerne la cohésion du composite et la protection des fibres de verre par rapport aux agents agressifs.

Les résultats de teneur en fibres des échantillons provenant de la structure P 11591 ainsi que ceux des échantillons « référence » sont présentés au tableau 7.

Tableau 7 : Résultats des essais de taux de fibres

Échantillons	Types de barres	Taux de fibres (%)
MC-15-008-1	Courbe	68,8
MC-15-008-2	Droite	77,8
MC-15-008-4	Courbe	70,8
MC-15-008-7	Droite	77,7
MC-15-001	Droite « référence »	78,6

Aucune différence notable n'est observable entre la teneur en fibres des échantillons de barres droites de la structure P-11591 et les échantillons de barres droites « référence ». Le taux de fibres est plus important dans le cas des barres droites ($\approx 78\%$) que dans le cas des barres courbes ($\approx 71\%$), ce qui est cohérent avec le fait que la densité des barres courbes est plus faible que celle des barres droites.

À titre indicatif, la norme CSA S807-10 exige une teneur en fibres minimale de 70 %.

6.2.7 Porosité

La présence de porosités dans un PRFV facilite le transport d'agents agressifs au cœur du composite et affaiblit la cohésion du matériau.

Des séries d'essais ont été réalisées sur les échantillons MC-15-008-1 (barre courbe), MC-15-008-3 (barre droite), MC-15-008-5 (barre courbe). Pour chaque série d'essais, trois échantillons consécutifs de 25 mm de long provenant d'une seule et même barre ont été trempés dans une solution de méthanol à 1 % de Fuchsine pendant une période de 15 min. Les porosités

des échantillons sont ensuite révélées par la montée de la solution (par capillarité) au sein de l'échantillon. La figure 5 montre les échantillons avant et après 15 min de trempage dans la solution.

La présence de cavités sur toute la longueur des échantillons MC-15-008-1 a été observée visuellement (voir première rangée figure 5). En raison du diamètre important de ces cavités ($> 0,90$ mm), la solution de trempage n'a pas traversé l'échantillon par capillarité malgré la présence de porosités évidente.



Figure 5 – Photos avant et après les essais de porosité des barres MC-15-008-1, MC-15-008-3 et MC-15-005-5

Pour l'échantillon MC-15-008-3 (voir deuxième rangée figure 5), aucune porosité n'a été observée. Par comparaison, au moins un point a été observé après 15 min de trempage dans la solution sur au moins un des triplicatas des échantillons de barres droites « référence » (MC-15-001).

Pour les échantillons MC-15-008-5, au moins un point a également été observé après 15 min de trempage dans la solution sur au moins un des triplicatas des échantillons (voir troisième rangée figure 5).

En conclusion, des vides plus importants sont observables sur les échantillons de barres courbes par rapport aux échantillons de barres droites. Étant donné l'absence de fissuration dans les échantillons et la géométrie des vides observés, les porosités des barres droites et courbes ont probablement été générées lors de la fabrication de celles-ci et non pas en raison d'une dégradation dans le temps du matériau.

6.2.8 Spectrométrie par fluorescence X (FRX)

Les compositions chimiques des fibres de verre des barres composites de la structure P-11591 de même que des barres « référence » ont été obtenues par spectrométrie par fluorescence X (FRX) et sont présentées au tableau 8.

Tableau 8 : Composition chimique des fibres de verre (par FRX)

Échantillons	Types de barres	SiO ₂ %	Ca O %	Al ₂ O ₃ %	Mg O %	Na ₂ O %	K ₂ O %	TiO ₂ %	Fe ₂ O ₃ %	ZnO %	B ₂ O ₃ %
MC-15-008-1	Courbe	54,0	22,8	13,7	0,32	0,89	0,07	0,53	0,27	< 0,01	7,3
MC-15-008-2	Droite	54,3	22,9	13,7	0,38	0,89	0,08	0,54	0,30	< 0,01	6,8
MC-15-008-4	Courbe	53,6	22,8	13,8	0,34	0,88	0,07	0,53	0,28	< 0,01	7,6
MC-15-008-7	Droite	53,8	22,9	13,8	0,39	0,91	0,10	0,54	0,31	< 0,01	7,1
MC-15-001	Droite « réf. »	54,5	22,9	13,7	0,39	0,89	0,09	0,54	0,30	< 0,01	6,7

Les compositions chimiques obtenues pour les barres droites ainsi que pour les barres courbes sont similaires et s'apparentent à de la fibre de verre borosilicaté de type E. Cette classe de fibre de verre est couramment utilisée pour la fabrication de PRFV en raison de son applicabilité universelle et de son faible coût comparativement à d'autres types de fibres de renforcement (ex. : carbone et aramide).

6.2.9 FTIR

La spectroscopie FTIR est une technique d'analyse permettant d'obtenir une empreinte chimique de la résine polymère d'un PRFV.

La durabilité de la matrice d'un PRFV est majoritairement fonction de la nature chimique de la structure de sa chaîne polymère (Mufti, Onefrei, & et coll., 2007). Dans le cas d'une résine polyester ou encore vinylester, les liaisons les plus faibles de leur chaîne polymère sont les fonctions ester. L'environnement alcalin du béton favorise l'apparition de réactions d'hydrolyse des liaisons ester de la matrice polymère, causant alors des bris dans la chaîne polymère (Mufti, Onefrei, & et coll., 2007). Cette réaction d'hydrolyse endommage la résine et les propriétés mécaniques du PRFV (voir mécanisme de dégradation de la figure 4). À l'échelle macroscopique, l'apparition de fines fissures est également possible.

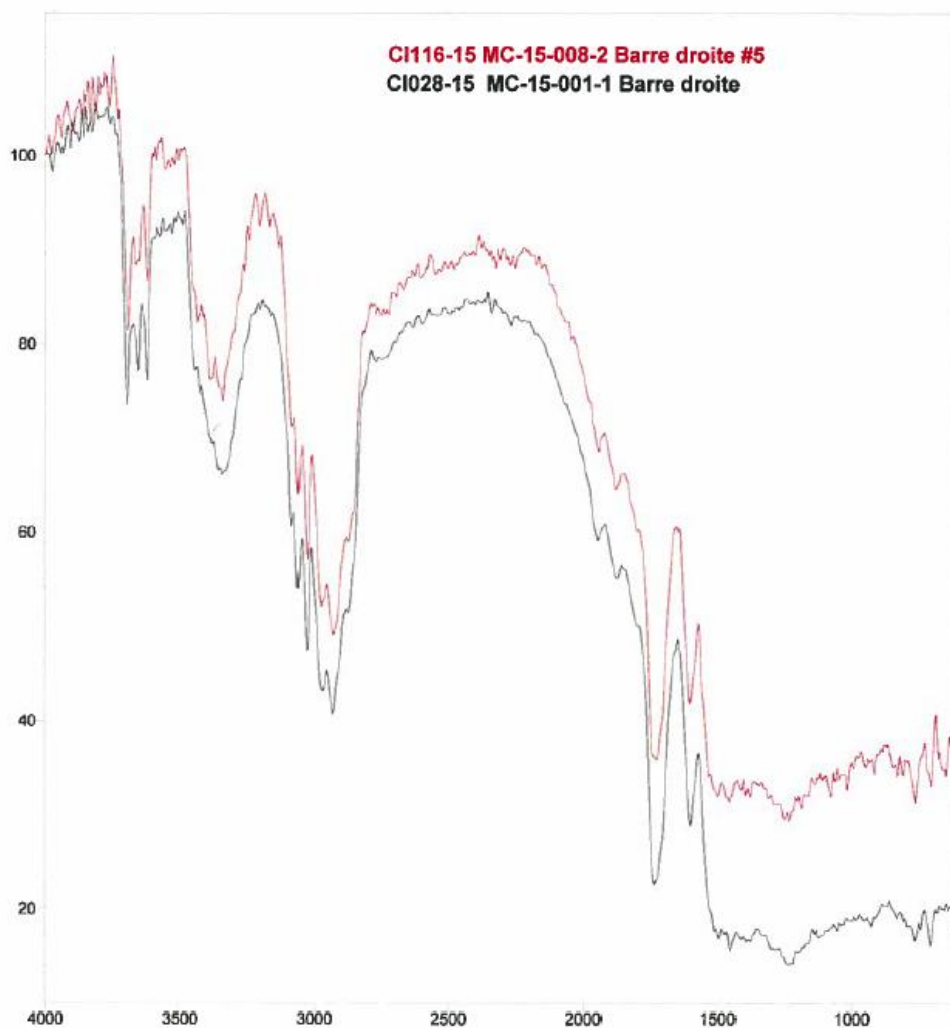


Figure 6 – FTIR de la barre droite MC-15-008-2

Le spectre FTIR de la barre droite identifiée MC-15-008-2 a été comparé au spectre FTIR d'une barre droite référence (MC-15-001-1) issue du même lot de fabrication (voir figure 6). Les deux spectres ne présentent aucune différence notable. Par conséquent, l'échantillon ne semble pas avoir subi de dégradation. En effet, les deux spectres ne présentent pas de différence en ce qui a trait à la plage de longueur d'onde s'étendant de 3000 cm^{-1} à 3500 cm^{-1} , c'est-à-dire dans la région principalement associée à des bandes d'absorption infrarouge (IR) correspondant aux groupements hydroxyles (-OH). Un changement sur le plan du contenu en groupements hydroxyles est un indicateur de la présence de possibles réactions d'hydrolyse des liaisons ester de la chaîne polymère (Mufti, Onofrei, & et coll., 2007).

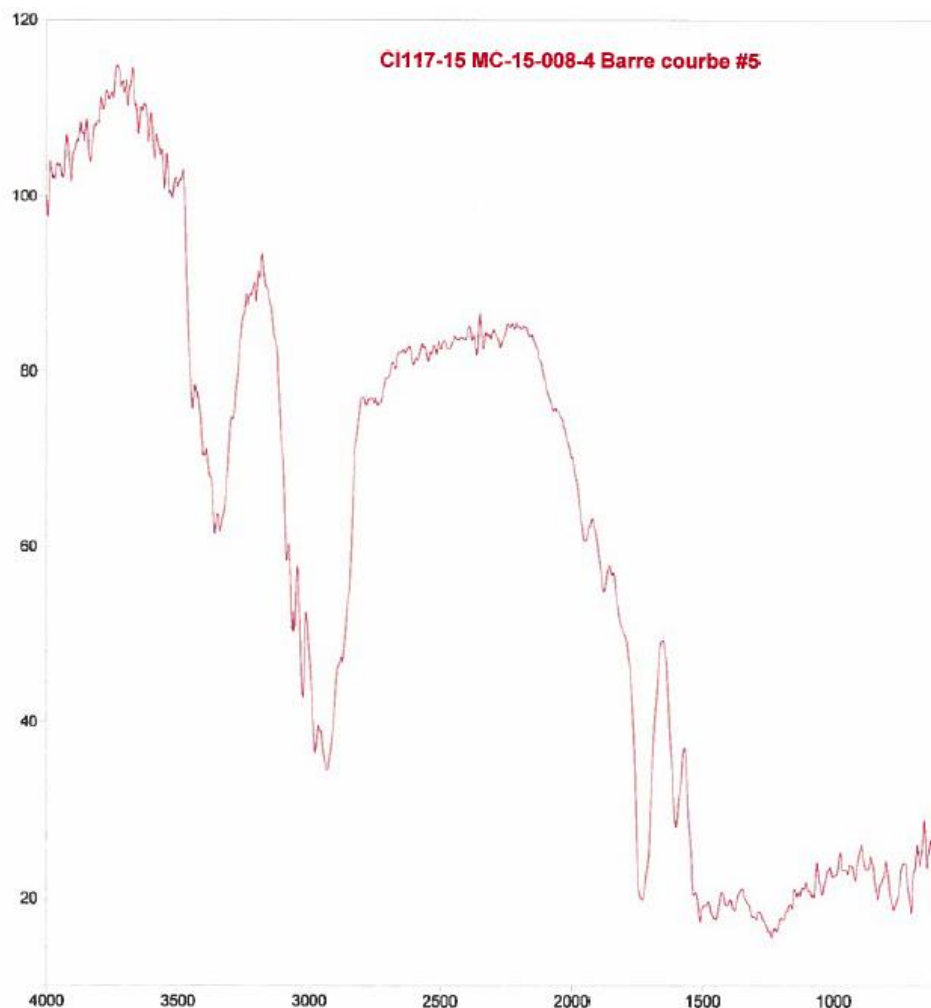


Figure 7 – FTIR de la barre courbe MC-15-008-4

Quant au spectre FTIR de la barre courbe identifiée MC-15-008-4, celui-ci n'a pu être comparé au spectre FTIR d'une barre courbe référence (MC-15-001-1) faute d'échantillons (voir figure 7). Aucune conclusion ne peut en être tirée. Toutefois, le spectre FTIR obtenu servira à titre de référence future.

6.2.10 Spectroscopie RMN à l'état solide

Un mandat a été octroyé en septembre 2015 au département de chimie de l'Université Laval pour confirmer que les barres d'armature en PRFV de la structure P-11591 étaient composées d'une résine vinylester. L'analyse a été effectuée par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN) du ^{13}C en phase solide. Le rapport d'analyse transmis par l'Université Laval est inclus à l'annexe H. Ce dernier présente les résultats obtenus et la démarche scientifique utilisée aux fins de l'analyse.

L'étude a bel et bien permis de confirmer que la résine des barres d'armature en PRFV de la structure P-11591 était de type vinylester.

À noter que les flèches bleues de la figure 8 représentent les pics caractéristiques d'une résine de type vinylester.

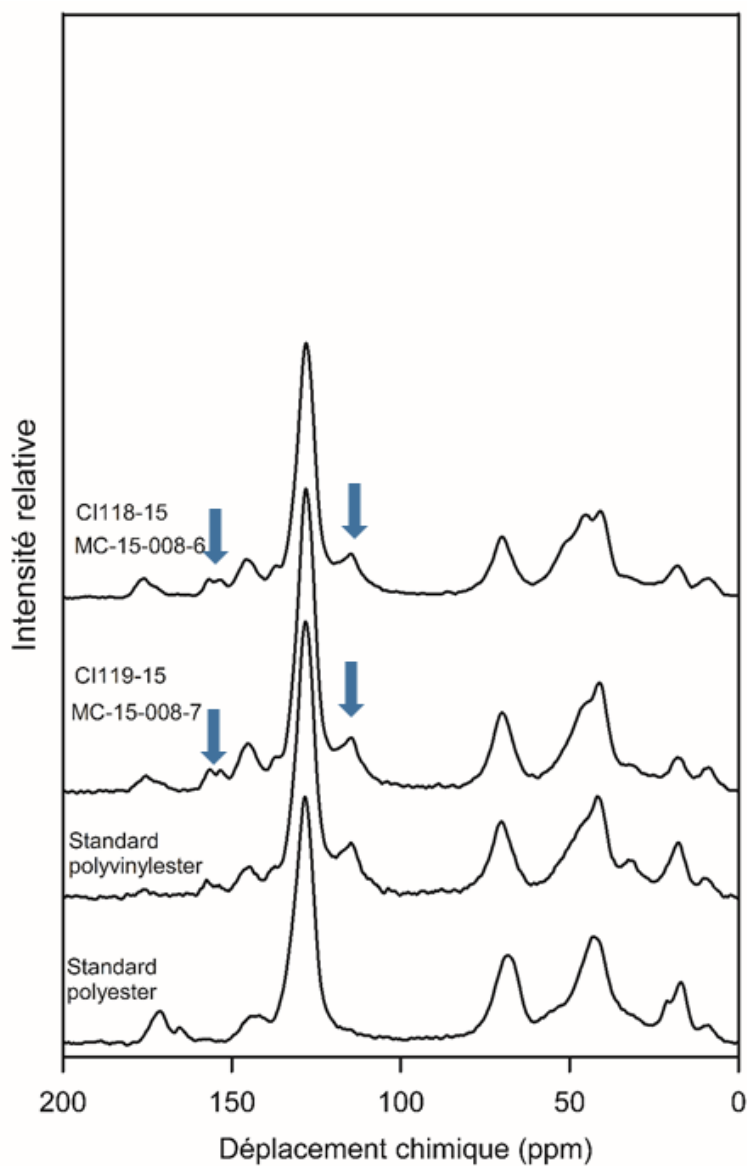


Figure 8 – Spectres RMN ¹³C en phase solide des échantillons de barres en PRFV de la structure P-11591

6.2.11 Microscopie électronique à balayage (MEB/EDS)

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'analyse permettant d'examiner en détail la microstructure d'une surface d'un échantillon. Dans le cas de barres d'armature en PRFV, l'observation au MEB permet de :

- 1) vérifier l'état des fibres de verre;
- 2) vérifier l'état de la matrice de polymère;
- 3) vérifier l'interface fibres-matrice;
- 4) vérifier l'interface béton-composite.

Préalablement aux observations effectuées au MEB, des sections transversales d'un échantillon d'une barre courbe (MC-15-008-6) et d'un échantillon d'une barre droite (MC-15-008-7) ont subi un traitement de surface à la suite d'un moulage dans une pastille d'époxy selon le protocole suivant :

- 1) prépolissage à l'eau à une pression de 30 N avec un papier abrasif fait de SiC (carbure de silicium) # 220 à 300 tours/min pendant 1 min;
- 2) prépolissage à l'eau à une pression de 30 N avec un papier abrasif fait de SiC (carbure de silicium) # 500 à 300 tours/min pendant 1 min;
- 3) polissage avec un disque MD-Largo et une suspension diamantée DiaPro Allegro/Largo avec grains de 9 µm à une pression de 30 N à 150 tours/min pendant 5 min;
- 4) rinçage à l'eau à 150 tours/min;
- 5) polissage avec un disque MD-Dur et une suspension diamantée DiaPro Allegro/Dur avec grains de 3 µm à une pression de 25 N à 150 tours/min pendant 5 min;
- 6) rinçage à l'eau à 150 tours/min;
- 7) polissage final avec un disque MD-Chem et une solution OP-U à une pression de 10 N à 150 tours/min pendant 1 min 30 s;
- 8) rinçage à l'eau à 150 tours/min.

La qualité des images obtenues au MEB de même que l'analyse en découplant est tributaire de la préparation de la surface. La technique d'analyse EDS (spectromètre couplé au MEB) a également été utilisée dans le cadre de cette étude pour des fins d'analyses élémentaires et de caractérisation chimique des échantillons. À noter que sur chacun des spectres EDS obtenus, des pics correspondant à de l'or (Au) et du palladium (Pd) sont observables. La présence de ces éléments est attribuable à la couche de métallisation d'Au/Pd résultant de la préparation des échantillons. Ce dépôt d'Au/Pd à la surface des échantillons a pour but de rendre la surface à analyser conductrice. Cette étape est primordiale pour réaliser les observations avec la microsonde électronique du MEB.

6.2.11.1 Échantillon MC-15-008-6 (barre courbe)

La figure 9 est une vue générale de l'échantillon MC-15-008-6. Trois porosités sont observables sur l'image. Ces porosités couvrent des sections variant d'environ $0,04 \text{ mm}^2$ à $0,14 \text{ mm}^2$ (porosités mesurées à l'aide du logiciel ImageJ). Une image MEB à fort grossissement (150X) d'une porosité de $0,14 \text{ mm}^2$ se retrouve à l'annexe I. Ces porosités sont probablement issues de la fabrication de la barre et ne sont pas à proprement parler des signes de détérioration.

La présence de porosité dans un échantillon a des conséquences sur les performances mécaniques (cohésion des fibres et de la matrice) et pourrait avoir un impact sur la durabilité à long terme du matériau.

De plus, la répartition des fibres n'est pas uniforme comme en témoigne l'image 9.

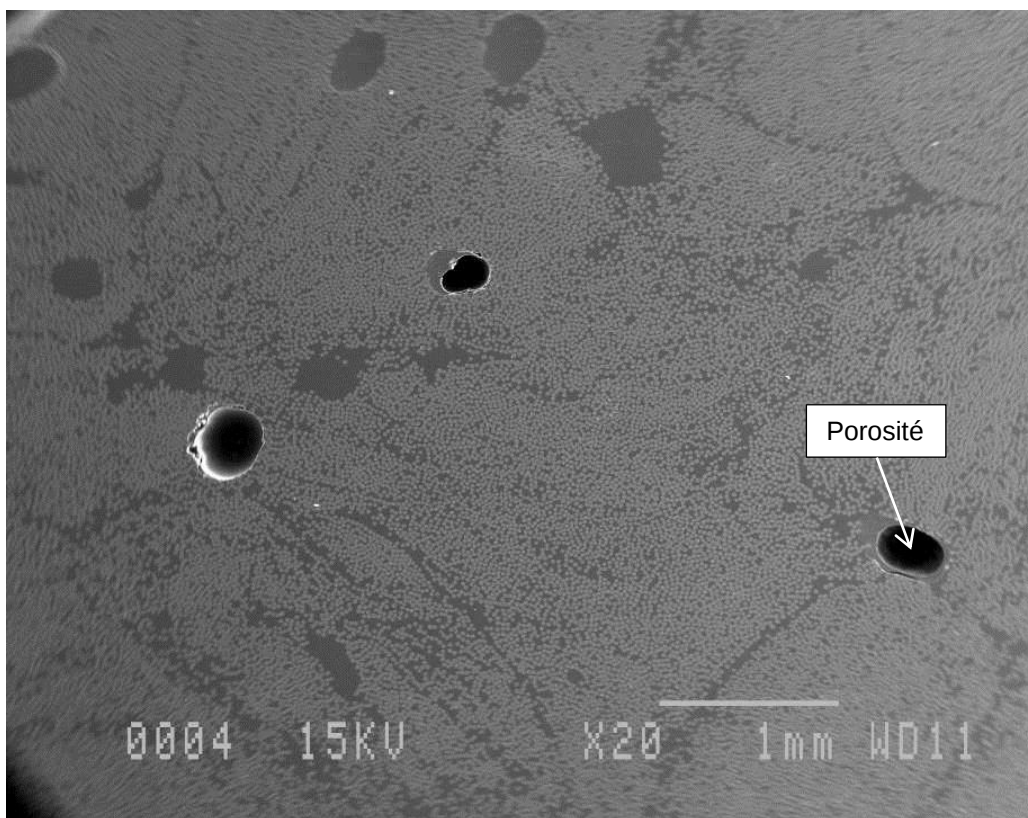


Figure 9 – Image au MEB d'une vue générale de la coupe transversale de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe)

La figure 10 montre une image de l'échantillon MC-15-008-6 à fort grossissement (1000X). L'image a été obtenue avec le mode d'imagerie en électrons secondaires du MEB. Aucun signe de détérioration (fissuration, pertes de section des fibres de verre) n'est visible au niveau de la matrice et des fibres de verre. De même, l'interface fibres-matrice ne présente aucun décollement.

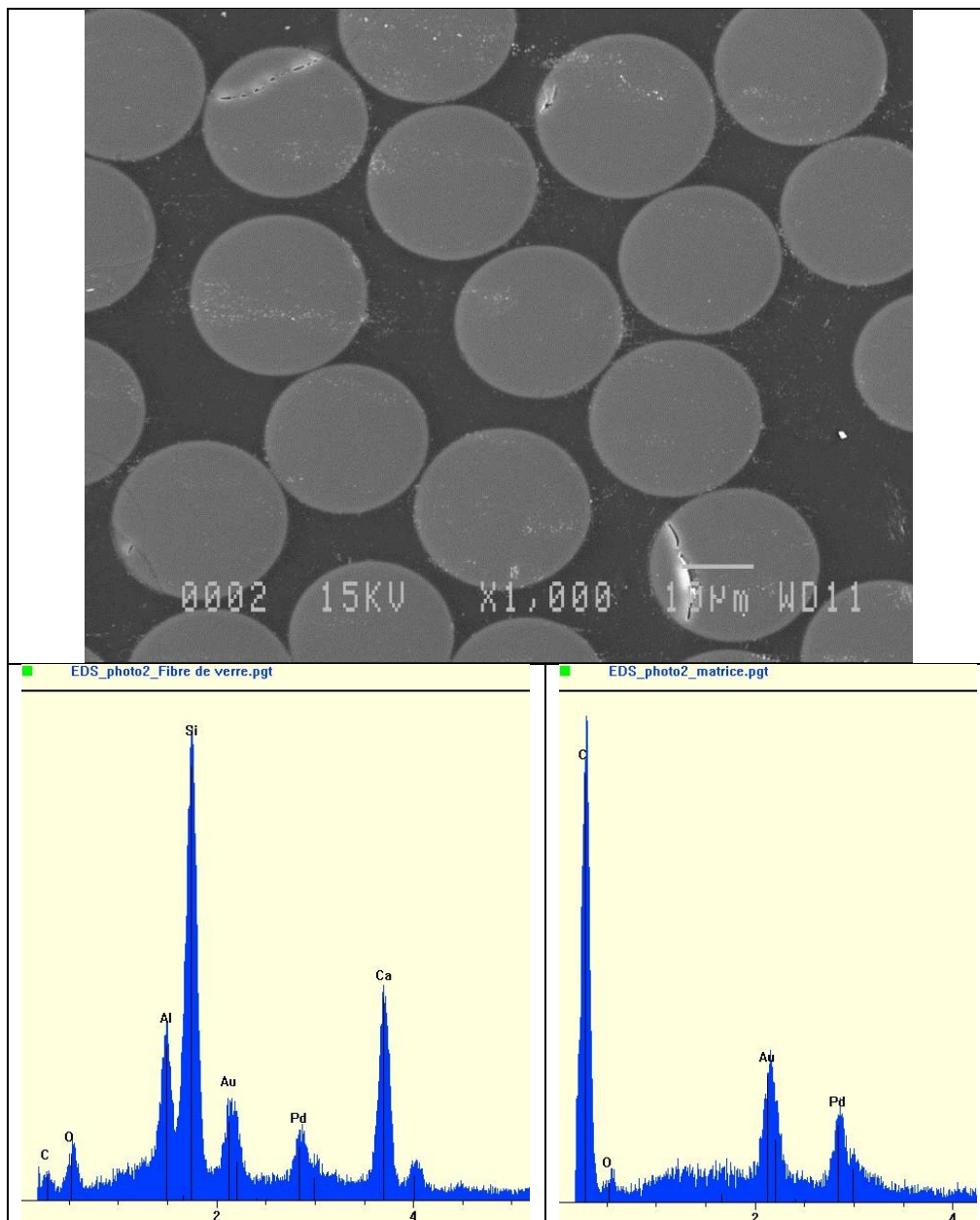


Figure 10 – Fort grossissement au MEB des fibres de verre et de la matrice de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe) et spectre EDS des fibres de verre et de la matrice

Des analyses EDS ont été effectuées sur les fibres de verre et sur la matrice polymère de l'échantillon MC-15-008-6 (voir figure 10). Le spectre obtenu pour les fibres de verre est typique de celles-ci et présente des pics caractéristiques de Si, de Ca, d'Al et d'O conformes à ce qui est attendu (voir section 6.2.8). Le spectre EDS de la matrice polymère présente quant à lui un pic caractéristique de C typique de ce que l'on retrouve dans le cas d'un polymère (squelette d'un polymère formé majoritairement de carbone).

La solution interstitielle du béton est fortement alcaline et est constitué principalement d'ions Na^+ , K^+ et OH^- (Mufti, Onefrei, & et coll., 2007). Il est bien connu que les fibres de verre se dissolvent en présence d'une solution alcaline. Par conséquent, il est intéressant de vérifier à l'aide de spectrométrie EDS la présence d'ions alcalins (Na^+ , K^+) dans la matrice, principalement au pourtour des fibres de verre. La spectrométrie EDS ne permet toutefois pas de détecter des éléments ou des ions plus légers que le sodium (Na) (Mufti, Onefrei, & et coll., 2007). Il est donc impossible de détecter l'anion hydroxyde, OH^- .

Aucun pic de potassium (K) ou de sodium (Na) n'a été détecté à la suite des différentes analyses de spectrométrie EDS sur l'échantillon MC-15-008-6, et ce, tant au niveau de la matrice que du pourtour des fibres de verre. L'échantillon ne présente donc pas d'ions alcalins potentiellement nuisibles au matériau. De plus, aucun pic de Si n'a été détecté dans la matrice aux environs immédiats des fibres de verre. La présence de Si indiquerait le cas échéant, une certaine dissolution des fibres de verre.

Au niveau de l'interface béton-composite, un léger décollement variant entre 0,5 μm et 25 μm a été mesuré à l'aide du logiciel ImageJ (voir figure 11). Il est toutefois impossible de déterminer si ce décollement découle des conditions d'exposition de la barre (humidité et alcalinité du béton, cycles de gel-dégel, efforts mécaniques, etc.) ou s'il résulte plutôt de la coupe transversale de l'échantillon.

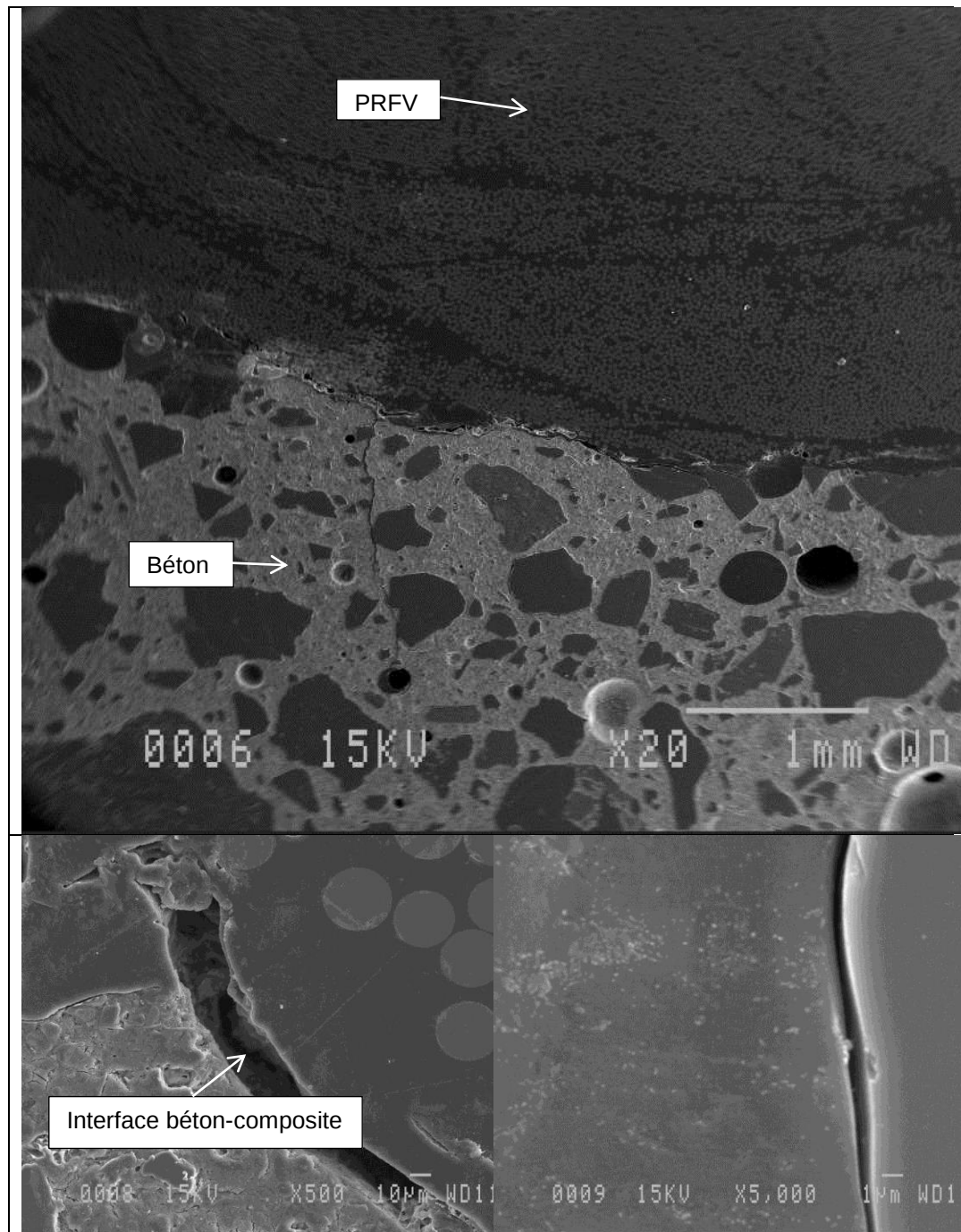


Figure 11 – Interface béton-composite de l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe)

6.2.11.2 Échantillon MC-15-008-7 (barre droite)

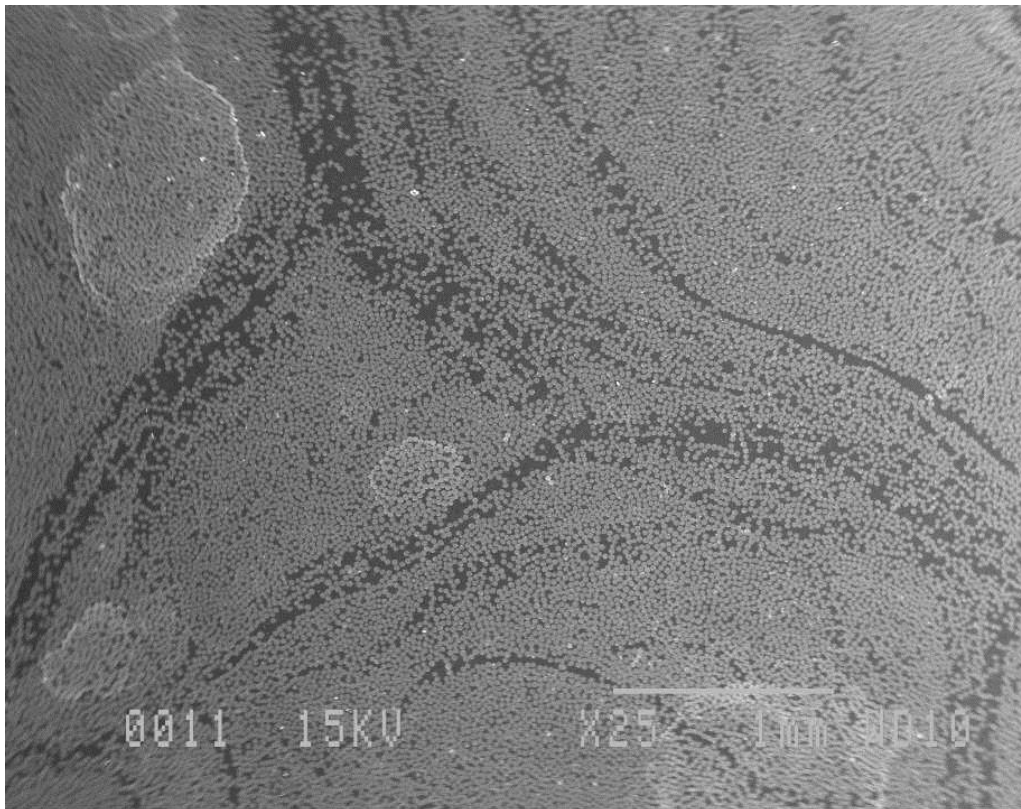


Figure 12 – Vue générale au MEB de la barre MC-15-008-7 (barre droite)

La figure 12 est une vue générale de l'échantillon MC-15-008-7. Contrairement à l'échantillon MC-15-008-6, l'échantillon MC-15-008-7 ne présentait aucune porosité visible.

Il est également possible d'observer une concentration de fibres de verre plus importante dans l'échantillon de barre droite comparativement à l'échantillon de barre courbe. Cette observation concorde avec les résultats obtenus à la section 6.2.6 (Taux de fibres).

La figure 13 montre une image à fort grossissement (1000X) de l'échantillon MC-15-008-7. L'image a été obtenue avec le mode d'imagerie en électrons secondaires du MEB. Aucun signe de détérioration (fissuration, pertes de section des fibres de verre) n'est visible au niveau de la matrice et des fibres de verre. De même, l'interface fibres-matrice ne présente aucun décollement. Certains éclats sont visibles sur les fibres de verre, mais ces derniers sont probablement issus de la découpe de l'échantillon et/ou de son polissage étant donné la nature fragile du matériau. De légers artefacts de polissage sont également visibles.

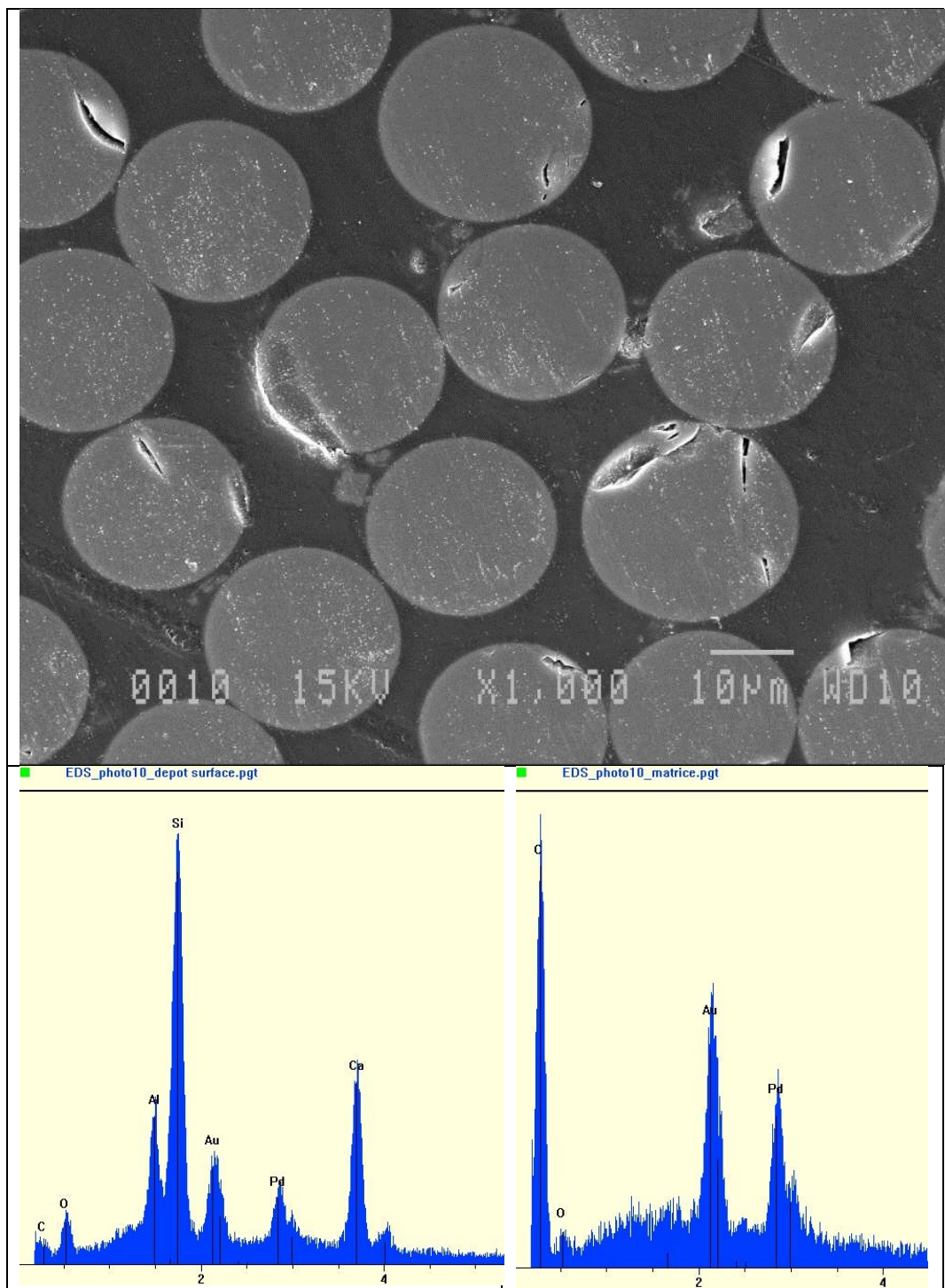
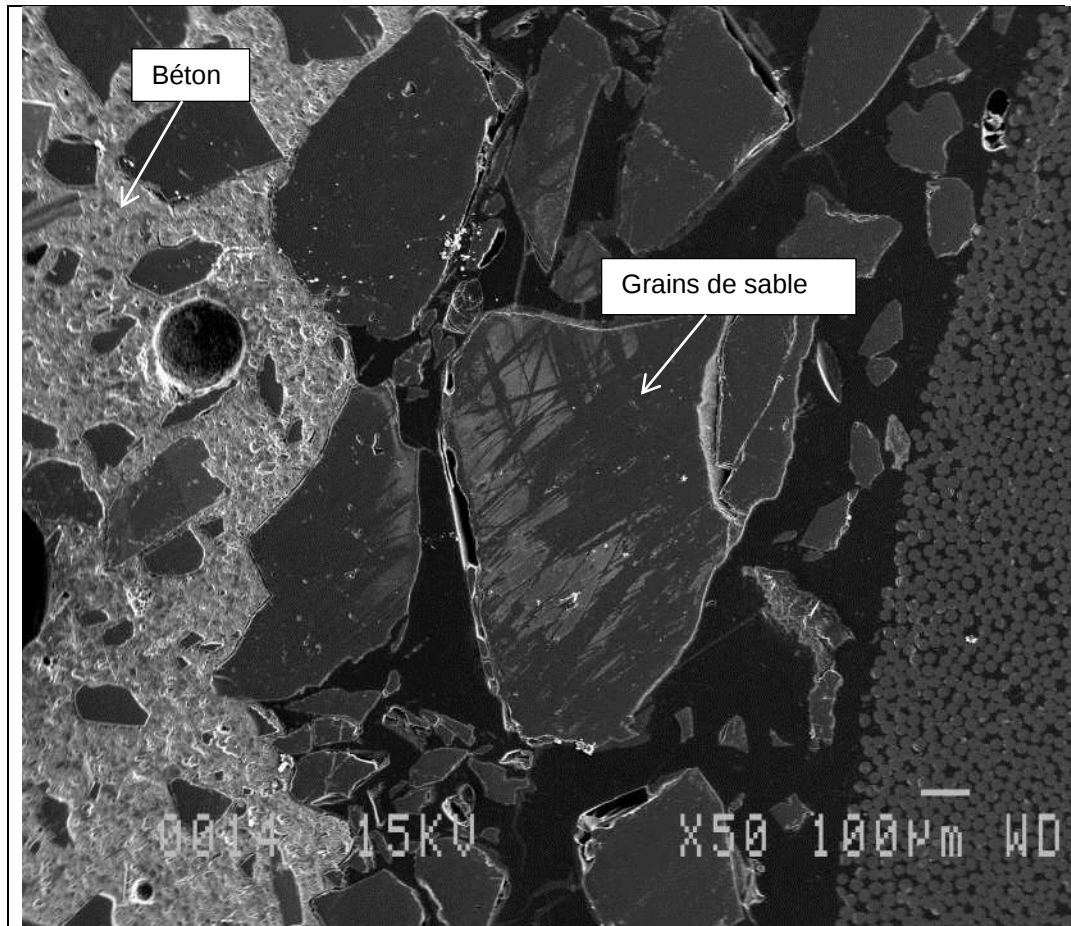


Figure 13 – Fort grossissement au MEB des fibres de verre et de la matrice de l'échantillon MC-15-008-7 (barre droite) et spectre EDS des fibres de verre et de la matrice

Les spectres EDS des fibres de verre (pics de Si, de Ca, d'Al et d'O) et de la matrice (pic de C) sont conventionnels et présentent encore une fois des pics caractéristiques conformes à ce qui est attendu pour ces matériaux. Aucun ion alcalin (Na^+ , K^+) n'a été détecté sur les spectres EDS de la matrice. En ce qui concerne l'anion hydroxyde OH^- , ce dernier n'est pas détectable par EDS pour les raisons mentionnées précédemment.



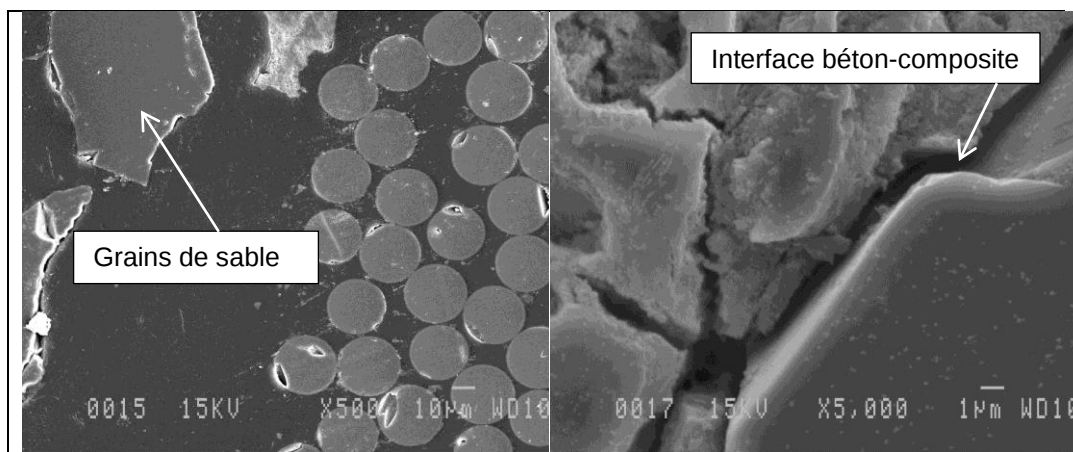


Figure 14 – Interface béton-composite de l'échantillon MC-15-008-7 (barre droite)

Comparativement à l'échantillon MC-15-008-6 (barre courbe) où un décollement allant jusqu'à 25 µm a été constaté, un décollement minime d'au plus 2 µm est observable à certains endroits au niveau de l'interface béton-composite de l'échantillon de barre droite MC-15-008-7 (voir figure 14). De plus, l'enrobage de grains de sable en périphérie de la barre droite ne présente aucun décollement avec le composite. Cet enrobage est essentiel afin d'assurer une adhérence adéquate de la barre dans le béton.

Comme décrit à la section 4.2, l'enrobage de la barre droite semble avoir nettement plus de grains de sable que celle de la barre courbe. À cet effet, il est possible de présumer que l'adhérence des barres droites au béton devrait être supérieure à celle des barres courbes.

À noter que des images MEB supplémentaires des échantillons MC-15-008-6 et MC-15-008-7 sont disponibles à l'annexe I.

7. CONCLUSION

L'expertise portant sur les barres d'armature en PRFV du pont P-11591, situé sur l'autoroute 20 est à Val-Alain, a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- Le béton des glissières ne présente aucun indice de détérioration.
- Les barres d'armature en PRFV droites et courbes ne présentaient aucun signe de détérioration après 11 ans de mise en service. Toutefois, les barres courbes montraient des porosités importantes probablement causées par leur mode de fabrication.
- Les propriétés physico-chimiques de barres droites en PRFV prélevées dans la structure ont été comparées à celles de barres droites

« référence » de 2004 provenant du même lot de fabrication et entreposé au SMI depuis la réalisation du projet. Il en est ressorti qu'aucun changement notable n'a été constaté. Quant aux propriétés physico-chimiques des barres courbes en PRFV prélevées dans la structure, celles-ci n'ont pu être comparées à des barres « référence » faute d'échantillon disponible. Toutefois, à partir des analyses réalisées, il n'y a pas lieu de croire que celles-ci ont subi une diminution de ces propriétés physico-chimiques.

- Des analyses réalisées par spectroscopie RMN au département de chimie de l'Université Laval ont permis de confirmer que les barres d'armature en PRFV de la structure étaient constituées d'une matrice à base de vinylester.
- Actuellement, il est impossible de corrélérer la dégradation au niveau physico-chimique avec la perte de performance mécanique des barres en PRFV. Cependant, puisque la structure a été instrumentée au moment de sa construction et que des essais de chargements statiques et dynamiques ont été réalisés avant sa mise en service (Benmokrane, El-Salakawy, El-Gamal, & Goulet, 2007), de nouveaux essais de chargement et de nouvelles collectes de données à partir de l'instrumentation déjà en place pourraient être envisagées afin d'étudier l'évolution du comportement structural de l'ouvrage.

En terminant, il n'y a pas lieu de croire sur la base de cette étude que les barres d'armature en PRFV à base d'une matrice de vinylester et de fibres de verre de la structure P-11591 présentent des risques de dégradation à court et moyen terme. À cet effet, il serait toutefois pertinent de reconduire une expertise similaire pour évaluer l'état de la structure et de ses constituants après 25 ans de mise en service, de manière à mieux prédire son comportement à long terme.

Tout en espérant que ces renseignements répondent à vos besoins, nous demeurons à votre entière disposition pour toute information ou toute interrogation suscitées à la lecture de ce document.


Marc-Antoine Loranger ing. jr
Claude Nazair, ing.

Secteur béton
Service des matériaux d'infrastructures

8. RÉFÉRENCES

- Benmokrane, B., Ali, A. H., Mohamed, H. M., Robert, M., & ElSafty, A. (2015, Août 5). Durability performance and service life of CFCC tendons exposed to elevated temperature and alkaline environment. *Journal of Composites for Construction*.
- Benmokrane, B., El-Salakawy, E., El-Gamal, S., & Goulet, S. (2007). Construction and testing of an innovative concrete bridge deck totally reinforced with glass FRP bars : Val-Alain bridge on highway 20 east. *Journal of Bridge Engineering*, 632-645.
- Mufti, A., Onefrei, M., & et coll. (2007). Field study of glass-fibre-reinforced polymer durability in concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* , 355-366.
- Nishizaki, S., & Meiarashi, I. (2002). Long-term deterioration of GFRP in water and moist environment. *Journal of composites for construction*, 21-27.
- Transports Québec. (2014). *Identification du pont*. Retrieved from Transports Québec:
https://www.diffusion.mtq.gouv.qc.ca/ords/pes/f?p=122:53:0::NO:53:P53_IDE_STRCT_0001:201212
- Won, J.-P., & et coll. (2008). The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar. *Composites Part B: engineering*, 764-772.

ANNEXE A
PLANS DE CONSTRUCTION DE LA STRUCTURE P-11591

**PONT
SUR L'AUTOROUTE 20 DIRECTION EST
AU-DESSUS DE LA RIVIÈRE HENRI**

Transports Québec

TABLE DES MATIÈRES

FEUILLE	DESCRIPTION
1	LOCALISATION ET DESCRIPTION GÉNÉRALE
2	PLAN D'ENSEMBLE
3	PONT EXISTANT - DÉMOLITION
4	SEMELLES-DIMENSIONS-ARMATURE - LOCALISATION DES PIEDS
5	CULÉE 1 - DIMENSIONS
6	CULÉE 1 - ARMATURE
7	CULÉE 2 - DIMENSIONS
8	CULÉE 2 - ARMATURE
9	CULÉES DRAINAGE DÉTAILS
10	CHARPENTE MÉTALLIQUE
11	CHARPENTE MÉTALLIQUE - CONTREVENTEMENTS
12	CHARPENTE MÉTALLIQUE - CONTREVENTEMENTS HORIZONTAUX
13	CHARPENTE MÉTALLIQUE - DÉTAILS
14	DALLE DIMENSIONS & ARMATURE
15	DALLE DIMENSIONS & ARMATURE (SUITE)
16	JOINT DIAPHRAGME D'EXTRÉMITÉ - MUR DE FRONT ET DRAINS
17	RECONNAISSANCE DES SOLS
18	RELIEF TOPOGRAPHIQUE
19	RELIEF TOPOGRAPHIQUE

CARTE: 21L 4-5
ÉCHELLE = 1 : 50 000

UNITE ADMINISTRATIVE
DIRECTION GÉNÉRALE
DES INFRASTRUCTURES
ET DES TECHNOLOGIES
DIRECTION DES STRUCTURES

LOCALISATION DU PROJET
RUE: 0 0 0 2 0 0 0 1 3 0
RUE: 0 0 0 2 0 0 0 1 3 0

MUNICIPALITÉ
VAL-ALAIN
MUNICIPALITÉ RÉGIONALE DE COMITÉ
LÉVELLÉ

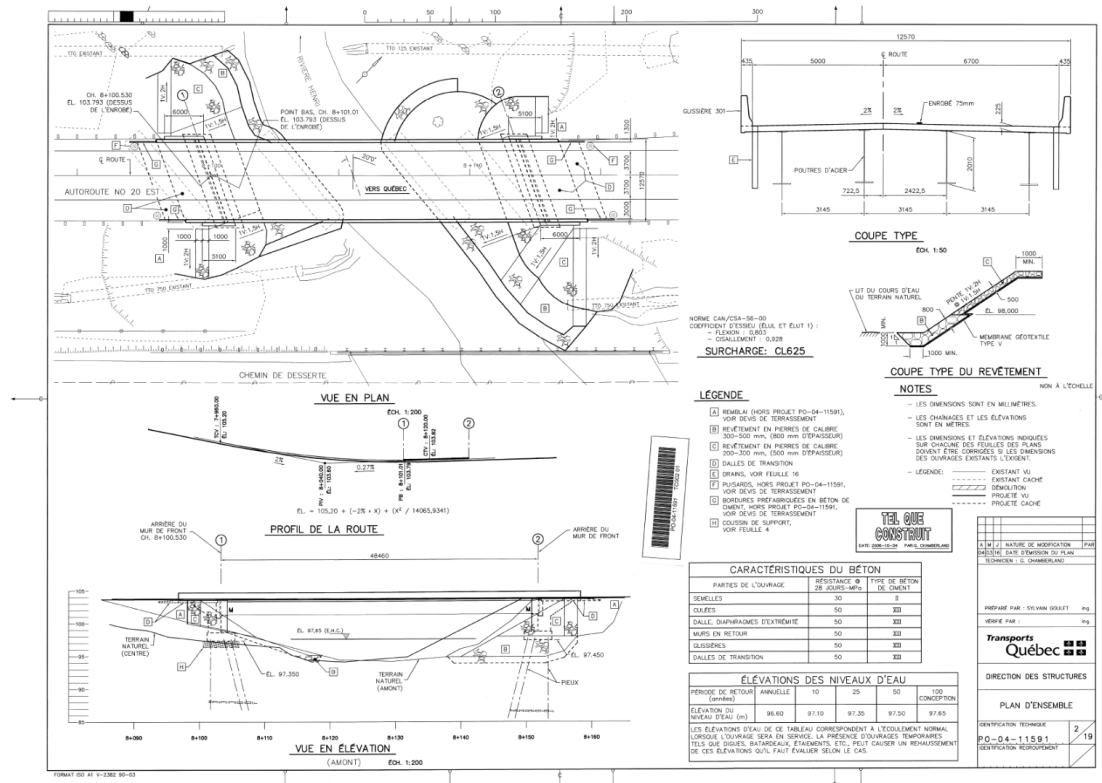
DESCRIPTION GÉNÉRALE
LOT TENDRE

BT 15 COC GÉOMATIQUE
34 75
COORDONNÉES GÉNÉRALISÉES
NAD 83
CARTES

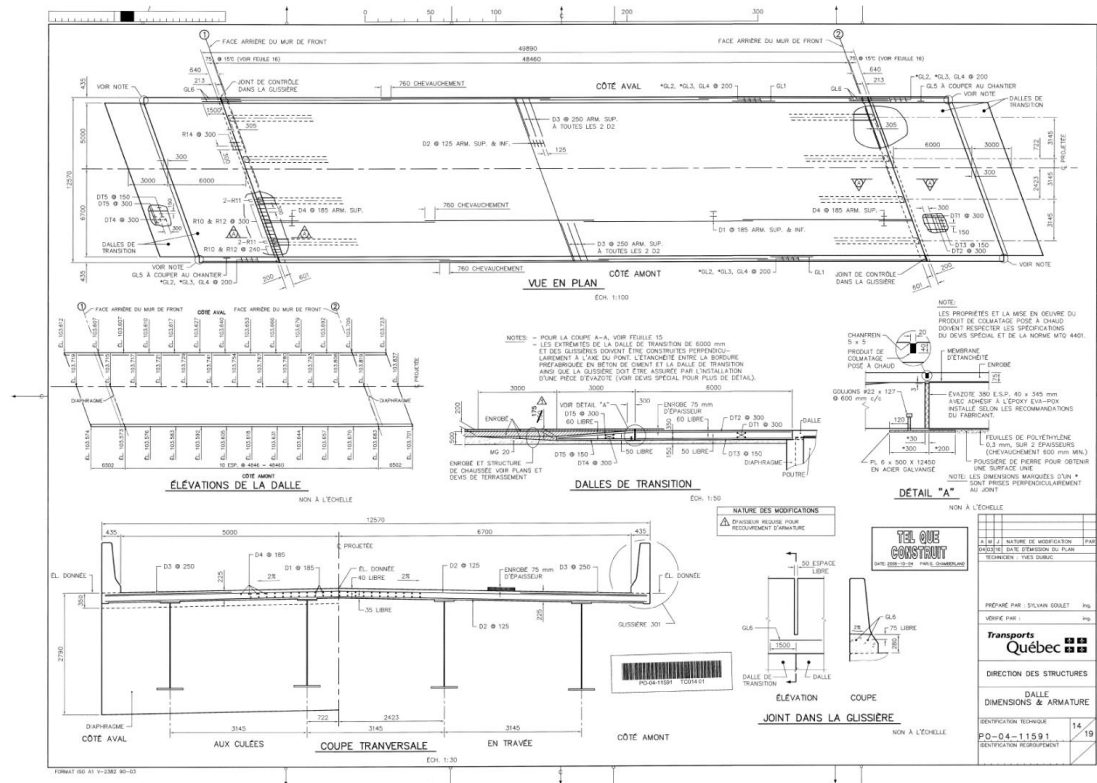
PROJET: 20-3475-0007
IN GÉNÉRAL: 3475-04-0003
IDENTIFICATION TECHNIQUE
P.O.-D.A.-115.91
IDENTIFICATION DES STRUCTURES

19

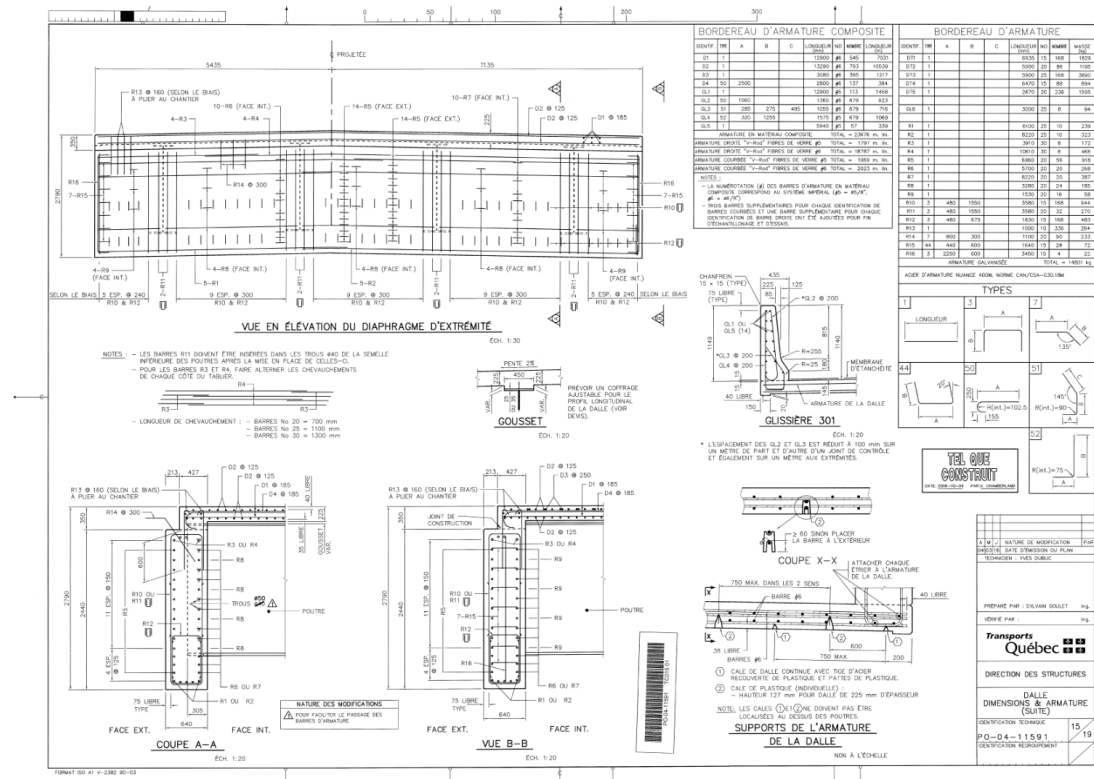
EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
 L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



ANNEXE B
DESCRIPTION VISUELLE DES CAROTTES

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

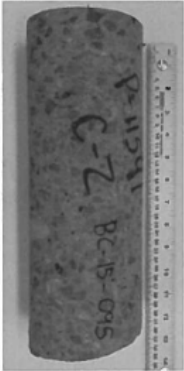
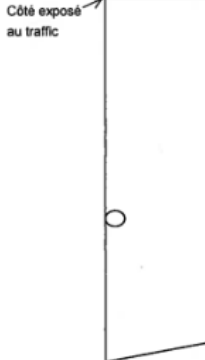
Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-34-S2b-072	Révision : 1 Date de révision : 2014-11-13
Description visuelle (prélèvement de béton durci)		
Localisation : Pont de Val-Alain (autoroute 20 est)		N° au laboratoire : BC-15-095
Obstacle : Rivière Henri		N° de l'échantillon : C1
N° de structure : P-11591		Date d'échantillonnage : 13 juil. 2015

Échantillon (φ = 150 mm)	Côté exposé au trafic		Croquis et notes générales	
	Vide de compaction 10 mm de profondeur	0 mm	Teneur ions Cl & absorption et vides perméables	0 mm
		65 mm	Récupération armature	50 mm
		80 mm	Perméabilité ions chlorure	90 mm
		155 mm	Récupération armature	140 mm
		170 mm	L-Barre	180 mm
		265 mm 280 mm	Pétrographie	200 mm 265 mm

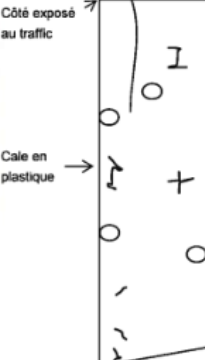
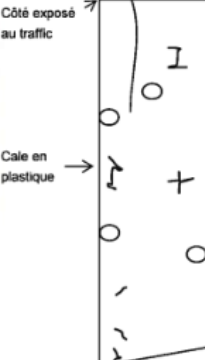
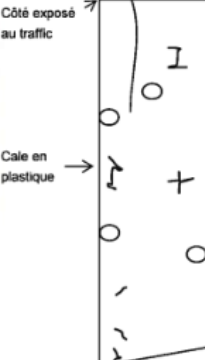
Description du forage <table style="width:100%;"> <tr> <td style="width:50%;">Matériaux</td> <td style="width:50%;">Épaisseur</td> </tr> <tr> <td>Enrobé bitumineux :</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Membrane :</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Glissière :</td> <td>285-280 mm</td> </tr> <tr> <td>Béton de réfection :</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Poutre :</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>Profondeur totale :</td> <td>285-280 mm</td> </tr> </table> Béton <table style="width:100%;"> <tr> <td style="width:50%;">Description générale :</td> <td style="width:50%;">Saine</td> </tr> <tr> <td>Adhérence B.B. / B.C. :</td> <td>N/A</td> </tr> <tr> <td>État de surface :</td> <td>Saine avec présence d'une fissure verticale ≤ 0,3 mm sur tout le diamètre de la carotte</td> </tr> <tr> <td>Fissure / Délaminage :</td> <td>Longue fissure longitudinal d'environ 0,1 mm sur pleine épaisseur</td> </tr> <tr> <td>État des armatures : (PRFV)</td> <td>20Ø courbe à 65 mm (porosité visible) 15Ø droite à 80 et 155 mm 15Ø courbe à 170 mm (porosité visible)</td> </tr> <tr> <td>Réaction alcalis-granulats :</td> <td>Aucune visuellement</td> </tr> </table>	Matériaux	Épaisseur	Enrobé bitumineux :	N/A	Membrane :	N/A	Glissière :	285-280 mm	Béton de réfection :	N/A	Poutre :	N/A	Profondeur totale :	285-280 mm	Description générale :	Saine	Adhérence B.B. / B.C. :	N/A	État de surface :	Saine avec présence d'une fissure verticale ≤ 0,3 mm sur tout le diamètre de la carotte	Fissure / Délaminage :	Longue fissure longitudinal d'environ 0,1 mm sur pleine épaisseur	État des armatures : (PRFV)	20Ø courbe à 65 mm (porosité visible) 15Ø droite à 80 et 155 mm 15Ø courbe à 170 mm (porosité visible)	Réaction alcalis-granulats :	Aucune visuellement	Description des essais <table style="width:100%;"> <tr> <td style="width:50%;">Essais :</td> <td style="width:50%;"></td> </tr> <tr> <td>Teneur en ions chlorure</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Absorption et vides perméables</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Perméabilité aux ions chlorure</td> <td></td> </tr> <tr> <td>L-Barre</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Pétrographie</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Résultats :</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Teneur en ions chlorure :</td> <td>0-12,5: 0,60 %; 12,5-25: 0,15 % et 25-50: 0,039%</td> </tr> <tr> <td>Absorption et vides perméables :</td> <td>abs. : 5,0% et vides perméables : 12,1%</td> </tr> <tr> <td>Perméabilité aux ions chlorure :</td> <td>664 C</td> </tr> <tr> <td>L-Barre :</td> <td>307 µm</td> </tr> <tr> <td>Commentaires :</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Forage total (horizontal) et une dizaine de vides de compaction apparents au pourtour de certaines armatures et au sein de la carotte de béton (photos BC-15-095)</td> </tr> </table>	Essais :		Teneur en ions chlorure		Absorption et vides perméables		Perméabilité aux ions chlorure		L-Barre		Pétrographie		Résultats :		Teneur en ions chlorure :	0-12,5: 0,60 %; 12,5-25: 0,15 % et 25-50: 0,039%	Absorption et vides perméables :	abs. : 5,0% et vides perméables : 12,1%	Perméabilité aux ions chlorure :	664 C	L-Barre :	307 µm	Commentaires :		Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.		Forage total (horizontal) et une dizaine de vides de compaction apparents au pourtour de certaines armatures et au sein de la carotte de béton (photos BC-15-095)	
Matériaux	Épaisseur																																																						
Enrobé bitumineux :	N/A																																																						
Membrane :	N/A																																																						
Glissière :	285-280 mm																																																						
Béton de réfection :	N/A																																																						
Poutre :	N/A																																																						
Profondeur totale :	285-280 mm																																																						
Description générale :	Saine																																																						
Adhérence B.B. / B.C. :	N/A																																																						
État de surface :	Saine avec présence d'une fissure verticale ≤ 0,3 mm sur tout le diamètre de la carotte																																																						
Fissure / Délaminage :	Longue fissure longitudinal d'environ 0,1 mm sur pleine épaisseur																																																						
État des armatures : (PRFV)	20Ø courbe à 65 mm (porosité visible) 15Ø droite à 80 et 155 mm 15Ø courbe à 170 mm (porosité visible)																																																						
Réaction alcalis-granulats :	Aucune visuellement																																																						
Essais :																																																							
Teneur en ions chlorure																																																							
Absorption et vides perméables																																																							
Perméabilité aux ions chlorure																																																							
L-Barre																																																							
Pétrographie																																																							
Résultats :																																																							
Teneur en ions chlorure :	0-12,5: 0,60 %; 12,5-25: 0,15 % et 25-50: 0,039%																																																						
Absorption et vides perméables :	abs. : 5,0% et vides perméables : 12,1%																																																						
Perméabilité aux ions chlorure :	664 C																																																						
L-Barre :	307 µm																																																						
Commentaires :																																																							
Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.																																																							
Forage total (horizontal) et une dizaine de vides de compaction apparents au pourtour de certaines armatures et au sein de la carotte de béton (photos BC-15-095)																																																							

Préparé par : Marc-Antoine Loranger, ing. jr.	Date : 22 sept. 2015
Approuvé par : Claude Nazair, ing.	Date : 17 déc. 2015

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

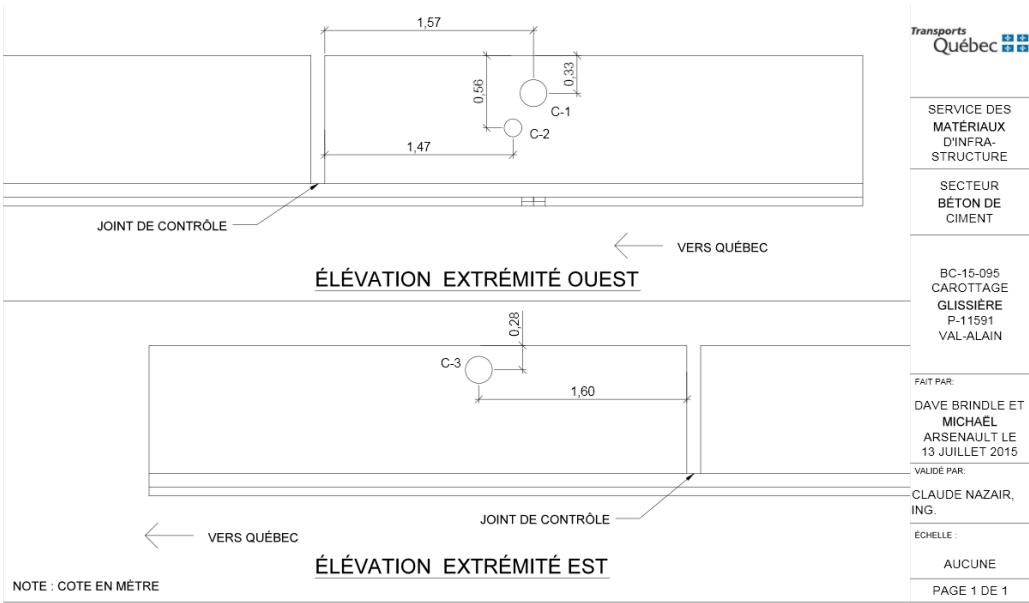
Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-34-S2b-072	Révision : 1 Date de révision : 2014-11-13																																																																												
Description visuelle (prélèvement de béton durci)																																																																														
Localisation : <u>Pont de Val-Alain (autoroute 20 est)</u> Obstacle : <u>Rivière Henri</u> N° de structure : <u>P-11591</u>		N° au laboratoire : <u>BC-15-095</u> N° de l'échantillon : <u>C2</u> Date d'échantillonnage : <u>13 juil. 2015</u>																																																																												
Échantillon ($\phi = 100$ mm)  Côté exposé au trafic  Croquis et notes générales <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">0 mm</td> <td style="width: 40%;"></td> <td style="width: 30%;">0 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Compression</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>190 mm</td> <td></td> <td>180 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Perméabilité ions chlorure</td> <td>200 mm</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>250 mm</td> </tr> <tr> <td>295 mm</td> <td style="text-align: center;">Teneur en ions Cl</td> <td></td> </tr> <tr> <td>305 mm</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>			0 mm		0 mm		Compression					190 mm		180 mm		Perméabilité ions chlorure	200 mm			250 mm	295 mm	Teneur en ions Cl		305 mm																																																						
0 mm		0 mm																																																																												
	Compression																																																																													
190 mm		180 mm																																																																												
	Perméabilité ions chlorure	200 mm																																																																												
		250 mm																																																																												
295 mm	Teneur en ions Cl																																																																													
305 mm																																																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="text-align: left;">Description du forage</th> <th colspan="2" style="text-align: left;">Description des essais</th> </tr> <tr> <td style="width: 50%;">Matériaux</td> <td style="width: 50%;">Épaisseur</td> <td colspan="2">Essais :</td> </tr> <tr> <td>Enrobé bitumineux :</td> <td>N/A</td> <td colspan="2">Résistance à la compression</td> </tr> <tr> <td>Membrane :</td> <td>N/A</td> <td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure</td> </tr> <tr> <td>Glissière :</td> <td>295-305 mm</td> <td colspan="2">Teneur en ions chlorure</td> </tr> <tr> <td>Béton de réparation :</td> <td>N/A</td> <td colspan="2"></td> </tr> <tr> <td>Poutre :</td> <td>N/A</td> <td colspan="2">Résultats :</td> </tr> <tr> <td>Profondeur totale :</td> <td>295-305 mm</td> <td colspan="2">Résistance à la compression : 59,9 Mpa</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Béton</td> <td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure : 435 C</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Description générale : Saine</td> <td colspan="2">Teneur en ions chlorure :</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Adhérence B.B. / B.C. : N/A</td> <td colspan="2">0-12,5: 0,33%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">État de surface : Saine</td> <td colspan="2">12,5-25: 0,075%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Fissure / Délaminage : Aucune</td> <td colspan="2">25-38: 0,028%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">État des armatures : partiel 15Ø droite à 190 mm (PRFV)</td> <td colspan="2">Commentaires :</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Réaction alcalis-granulats : Aucune visuellement</td> <td colspan="2">Forage total (horizontal)</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Carotte de 100 mm de diamètre</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Vides de compaction apparents</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Photos additionnelles dans BC-15-095</td> </tr> <tr> <td colspan="2"></td> <td colspan="2">Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.</td> </tr> </table>			Description du forage		Description des essais		Matériaux	Épaisseur	Essais :		Enrobé bitumineux :	N/A	Résistance à la compression		Membrane :	N/A	Perméabilité aux ions chlorure		Glissière :	295-305 mm	Teneur en ions chlorure		Béton de réparation :	N/A			Poutre :	N/A	Résultats :		Profondeur totale :	295-305 mm	Résistance à la compression : 59,9 Mpa		Béton		Perméabilité aux ions chlorure : 435 C		Description générale : Saine		Teneur en ions chlorure :		Adhérence B.B. / B.C. : N/A		0-12,5: 0,33%		État de surface : Saine		12,5-25: 0,075%		Fissure / Délaminage : Aucune		25-38: 0,028%		État des armatures : partiel 15Ø droite à 190 mm (PRFV)		Commentaires :		Réaction alcalis-granulats : Aucune visuellement		Forage total (horizontal)				Carotte de 100 mm de diamètre				Vides de compaction apparents				Photos additionnelles dans BC-15-095				Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.	
Description du forage		Description des essais																																																																												
Matériaux	Épaisseur	Essais :																																																																												
Enrobé bitumineux :	N/A	Résistance à la compression																																																																												
Membrane :	N/A	Perméabilité aux ions chlorure																																																																												
Glissière :	295-305 mm	Teneur en ions chlorure																																																																												
Béton de réparation :	N/A																																																																													
Poutre :	N/A	Résultats :																																																																												
Profondeur totale :	295-305 mm	Résistance à la compression : 59,9 Mpa																																																																												
Béton		Perméabilité aux ions chlorure : 435 C																																																																												
Description générale : Saine		Teneur en ions chlorure :																																																																												
Adhérence B.B. / B.C. : N/A		0-12,5: 0,33%																																																																												
État de surface : Saine		12,5-25: 0,075%																																																																												
Fissure / Délaminage : Aucune		25-38: 0,028%																																																																												
État des armatures : partiel 15Ø droite à 190 mm (PRFV)		Commentaires :																																																																												
Réaction alcalis-granulats : Aucune visuellement		Forage total (horizontal)																																																																												
		Carotte de 100 mm de diamètre																																																																												
		Vides de compaction apparents																																																																												
		Photos additionnelles dans BC-15-095																																																																												
		Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.																																																																												
Préparé par : <u>Marc-Antoine Loranger, Ing. jr</u> Approuvé par : <u>Claude Nazair, ing.</u>		Date : <u>22 sept. 2015</u> Date : <u>17 déc. 2015</u>																																																																												

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-34-S2b-072	Révision : 1 Date de révision : 2014-11-13																																																										
Description visuelle (prélèvement de béton durci)																																																												
<table style="width:100%; border: none;"> <tr> <td style="width:50%; border: none;"> Localisation : Pont de Val-Alain (autoroute 20 est) Obstacle : Rivière Henri N° de structure : P-11591 </td> <td style="width:50%; border: none;"> N° au laboratoire : BC-15-095 N° de l'échantillon : C3 Date d'échantillonnage : 13 juil. 2015 </td> </tr> </table>			Localisation : Pont de Val-Alain (autoroute 20 est) Obstacle : Rivière Henri N° de structure : P-11591	N° au laboratoire : BC-15-095 N° de l'échantillon : C3 Date d'échantillonnage : 13 juil. 2015																																																								
Localisation : Pont de Val-Alain (autoroute 20 est) Obstacle : Rivière Henri N° de structure : P-11591	N° au laboratoire : BC-15-095 N° de l'échantillon : C3 Date d'échantillonnage : 13 juil. 2015																																																											
<table style="width:100%; border: none;"> <tr> <td style="width:30%; vertical-align: top;"> Échantillon ($\phi = 150$ mm)  </td> <td style="width:30%; vertical-align: top;"> Croquis et notes générales  </td> <td style="width:40%; vertical-align: top;"> <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">0 mm</td><td style="width:50%;">Teneur ions Cl & absorption et vides perméables</td><td style="width:50%;">0 mm</td></tr> <tr><td>70 mm</td><td>Récupération armature</td><td>60 mm</td></tr> <tr><td>90 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>110 mm</td></tr> <tr><td>185 mm</td><td>Récupération armature</td><td>160 mm</td></tr> <tr><td>200 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>210 mm</td></tr> <tr><td>260 mm</td><td></td><td>260 mm</td></tr> <tr><td>280 mm</td><td></td><td></td></tr> </table> </td> </tr> </table>			Échantillon ($\phi = 150$ mm) 	Croquis et notes générales 	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">0 mm</td><td style="width:50%;">Teneur ions Cl & absorption et vides perméables</td><td style="width:50%;">0 mm</td></tr> <tr><td>70 mm</td><td>Récupération armature</td><td>60 mm</td></tr> <tr><td>90 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>110 mm</td></tr> <tr><td>185 mm</td><td>Récupération armature</td><td>160 mm</td></tr> <tr><td>200 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>210 mm</td></tr> <tr><td>260 mm</td><td></td><td>260 mm</td></tr> <tr><td>280 mm</td><td></td><td></td></tr> </table>	0 mm	Teneur ions Cl & absorption et vides perméables	0 mm	70 mm	Récupération armature	60 mm	90 mm	Perméabilité ions chlorure	110 mm	185 mm	Récupération armature	160 mm	200 mm	Perméabilité ions chlorure	210 mm	260 mm		260 mm	280 mm																																				
Échantillon ($\phi = 150$ mm) 	Croquis et notes générales 	<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">0 mm</td><td style="width:50%;">Teneur ions Cl & absorption et vides perméables</td><td style="width:50%;">0 mm</td></tr> <tr><td>70 mm</td><td>Récupération armature</td><td>60 mm</td></tr> <tr><td>90 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>110 mm</td></tr> <tr><td>185 mm</td><td>Récupération armature</td><td>160 mm</td></tr> <tr><td>200 mm</td><td>Perméabilité ions chlorure</td><td>210 mm</td></tr> <tr><td>260 mm</td><td></td><td>260 mm</td></tr> <tr><td>280 mm</td><td></td><td></td></tr> </table>	0 mm	Teneur ions Cl & absorption et vides perméables	0 mm	70 mm	Récupération armature	60 mm	90 mm	Perméabilité ions chlorure	110 mm	185 mm	Récupération armature	160 mm	200 mm	Perméabilité ions chlorure	210 mm	260 mm		260 mm	280 mm																																							
0 mm	Teneur ions Cl & absorption et vides perméables	0 mm																																																										
70 mm	Récupération armature	60 mm																																																										
90 mm	Perméabilité ions chlorure	110 mm																																																										
185 mm	Récupération armature	160 mm																																																										
200 mm	Perméabilité ions chlorure	210 mm																																																										
260 mm		260 mm																																																										
280 mm																																																												
<table style="width:100%; border: none;"> <tr> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> Description du forage <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Matériaux</td><td style="width:50%;">Épaisseur</td></tr> <tr><td>Enrobé bitumineux :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Membrane :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Glissière :</td><td>260-280 mm</td></tr> <tr><td>Béton de réfection :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Poutre :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Profondeur totale :</td><td>260-280 mm</td></tr> </table> Béton <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Description générale :</td><td style="width:50%;">Saine</td></tr> <tr><td>Adhérence B.B. / B.C. :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>État de surface :</td><td>Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm</td></tr> <tr><td>Fissure / Délaminage :</td><td>Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon</td></tr> <tr><td>État des armatures : (PRFV)</td><td>20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm</td></tr> <tr><td>Réaction alcalis-granulats :</td><td>Aucune visuellement</td></tr> </table> </td> <td style="width:50%; vertical-align: top;"> Description des essais <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2">Essais :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Résultats :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables :</td></tr> <tr><td colspan="2">abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure : 266 C</td></tr> <tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.</td></tr> <tr><td colspan="2">Forage total (horizontal)</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de cales en plastique à 14 endroits</td></tr> <tr><td colspan="2">Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton</td></tr> <tr><td colspan="2">Voir photos dans BC-15-095</td></tr> </table> </td> </tr> </table>			Description du forage <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Matériaux</td><td style="width:50%;">Épaisseur</td></tr> <tr><td>Enrobé bitumineux :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Membrane :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Glissière :</td><td>260-280 mm</td></tr> <tr><td>Béton de réfection :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Poutre :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Profondeur totale :</td><td>260-280 mm</td></tr> </table> Béton <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Description générale :</td><td style="width:50%;">Saine</td></tr> <tr><td>Adhérence B.B. / B.C. :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>État de surface :</td><td>Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm</td></tr> <tr><td>Fissure / Délaminage :</td><td>Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon</td></tr> <tr><td>État des armatures : (PRFV)</td><td>20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm</td></tr> <tr><td>Réaction alcalis-granulats :</td><td>Aucune visuellement</td></tr> </table>	Matériaux	Épaisseur	Enrobé bitumineux :	N/A	Membrane :	N/A	Glissière :	260-280 mm	Béton de réfection :	N/A	Poutre :	N/A	Profondeur totale :	260-280 mm	Description générale :	Saine	Adhérence B.B. / B.C. :	N/A	État de surface :	Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm	Fissure / Délaminage :	Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon	État des armatures : (PRFV)	20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm	Réaction alcalis-granulats :	Aucune visuellement	Description des essais <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2">Essais :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Résultats :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables :</td></tr> <tr><td colspan="2">abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure : 266 C</td></tr> <tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.</td></tr> <tr><td colspan="2">Forage total (horizontal)</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de cales en plastique à 14 endroits</td></tr> <tr><td colspan="2">Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton</td></tr> <tr><td colspan="2">Voir photos dans BC-15-095</td></tr> </table>	Essais :		Teneur en ions chlorure		Absorption et vides perméables		Perméabilité aux ions chlorure		Résultats :		Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%		Absorption et vides perméables :		abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%		Perméabilité aux ions chlorure : 266 C		Commentaires :		Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.		Forage total (horizontal)		Présence de cales en plastique à 14 endroits		Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton		Voir photos dans BC-15-095	
Description du forage <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Matériaux</td><td style="width:50%;">Épaisseur</td></tr> <tr><td>Enrobé bitumineux :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Membrane :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Glissière :</td><td>260-280 mm</td></tr> <tr><td>Béton de réfection :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Poutre :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>Profondeur totale :</td><td>260-280 mm</td></tr> </table> Béton <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width:50%;">Description générale :</td><td style="width:50%;">Saine</td></tr> <tr><td>Adhérence B.B. / B.C. :</td><td>N/A</td></tr> <tr><td>État de surface :</td><td>Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm</td></tr> <tr><td>Fissure / Délaminage :</td><td>Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon</td></tr> <tr><td>État des armatures : (PRFV)</td><td>20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm</td></tr> <tr><td>Réaction alcalis-granulats :</td><td>Aucune visuellement</td></tr> </table>	Matériaux	Épaisseur	Enrobé bitumineux :	N/A	Membrane :	N/A	Glissière :	260-280 mm	Béton de réfection :	N/A	Poutre :	N/A	Profondeur totale :	260-280 mm	Description générale :	Saine	Adhérence B.B. / B.C. :	N/A	État de surface :	Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm	Fissure / Délaminage :	Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon	État des armatures : (PRFV)	20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm	Réaction alcalis-granulats :	Aucune visuellement	Description des essais <table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td colspan="2">Essais :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure</td></tr> <tr><td colspan="2">Résultats :</td></tr> <tr><td colspan="2">Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%</td></tr> <tr><td colspan="2">Absorption et vides perméables :</td></tr> <tr><td colspan="2">abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%</td></tr> <tr><td colspan="2">Perméabilité aux ions chlorure : 266 C</td></tr> <tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.</td></tr> <tr><td colspan="2">Forage total (horizontal)</td></tr> <tr><td colspan="2">Présence de cales en plastique à 14 endroits</td></tr> <tr><td colspan="2">Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton</td></tr> <tr><td colspan="2">Voir photos dans BC-15-095</td></tr> </table>	Essais :		Teneur en ions chlorure		Absorption et vides perméables		Perméabilité aux ions chlorure		Résultats :		Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%		Absorption et vides perméables :		abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%		Perméabilité aux ions chlorure : 266 C		Commentaires :		Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.		Forage total (horizontal)		Présence de cales en plastique à 14 endroits		Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton		Voir photos dans BC-15-095				
Matériaux	Épaisseur																																																											
Enrobé bitumineux :	N/A																																																											
Membrane :	N/A																																																											
Glissière :	260-280 mm																																																											
Béton de réfection :	N/A																																																											
Poutre :	N/A																																																											
Profondeur totale :	260-280 mm																																																											
Description générale :	Saine																																																											
Adhérence B.B. / B.C. :	N/A																																																											
État de surface :	Saine, fissure apparente $\leq 0,1$ mm																																																											
Fissure / Délaminage :	Fissure longitudinale $\leq 0,1$ mm sur la moitié supérieure de l'échantillon																																																											
État des armatures : (PRFV)	20Ø courbe à 70 mm 15Ø droite à 90 et 185 mm 15Ø courbe à 200 mm																																																											
Réaction alcalis-granulats :	Aucune visuellement																																																											
Essais :																																																												
Teneur en ions chlorure																																																												
Absorption et vides perméables																																																												
Perméabilité aux ions chlorure																																																												
Résultats :																																																												
Teneur en ions chlorure : 0-12.5: 0,38%; 12.5-25: 0,14%; 25-50: 0,021% et 50-56: 0,017%																																																												
Absorption et vides perméables :																																																												
abs. : 4,0% et vides perméables : 9,7%																																																												
Perméabilité aux ions chlorure : 266 C																																																												
Commentaires :																																																												
Présence de petites tâches blanches sur la surface sciée de plusieurs granulats.																																																												
Forage total (horizontal)																																																												
Présence de cales en plastique à 14 endroits																																																												
Dizaine de vides de compaction apparents au poutour de certaines armatures, cales et dans la carotte de béton																																																												
Voir photos dans BC-15-095																																																												
Préparé par : Marc-Antoine Loranger, ing. jr Approuvé par : Claude Nazair, ing.		Date : 22 sept. 2015 Date : 17 déc. 2015																																																										

ANNEXE C
SCHÉMA DE LOCALISATION DES CAROTTES

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



ANNEXE D
CERTIFICAT DE CONFORMITÉ DES BARRES D'ARMATURE
EN PRFV

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

Certificat de conformité

Pultrall
13-09-2004

Identification du renfort	Propriétés	Résultats 1	Résultats 2	Résultats 3	Résultats 4	Résultats 5	Moyenne	Ecart Type (s)	Valeur garantie	Requis MTQ
Armature droite V-3x40 #5 (lot 043006)	Résistance en traction (Mpa)	746	751	764	816	784	772	29	708	755
	Module d'Young (Gpa)	44	44	44	45	49	46	2,3	41	46
	Dosage en fibre (% massique)	75,6	75,7	75,2			79	0,3	78	
	Tg (°C)	120	117	114	116	106	115	5,0	103	
	Absorption d'eau (‰)	0,19	0,23	0,21	0,26	0,24	0,23	0,03	0,17	
	Diamètre effectif (mm)	16,0					16,0	n.a.	n.a.	
	Aire transversal (mm ²)	201,6					201,6	n.a.	n.a.	
	Circonférence effective (mm)	80,3					80,3	n.a.	n.a.	
Armature droite V-3x40 #6 (lot 043021)	Résistance en traction (Mpa)	646	657	703	679	663	670	22,2	619	612
	Module d'Young (Gpa)	43	43	47	47	49	46	3,1	39	42
	Dosage en fibre (% massique)	75,4	75,3	75,3			78	0,1	78	
	Tg (°C)	118	116	113	112	117	115	2,8	109	
	Absorption d'eau (‰)	0,3	0,29	0,28	0,29	0,26	0,28	0,02	0,28	
	Diamètre effectif (mm)	20,4					20,4	n.a.	n.a.	
	Aire transversal (mm ²)	325,7					325,7	n.a.	n.a.	
	Circonférence effective (mm)	64,0					64,0	n.a.	n.a.	
Armature courbe V-3x40 #5 section courbe	Résistance en traction (Mpa)	488	478	479	474	474	479	5,7	465	400
	Dosage en fibre (% massique)	67,3	71,6	69,1			69,3	2,2	64	
	Tg (°C)	127	127	129	124	127	127	1,6	123	
	Absorption d'eau (‰)	0,61	0,46	0,41	0,28	-0,04	0,49	0,26	0	
	Diamètre effectif (mm)	16,2					16,2	n.a.	n.a.	
	Aire transversal (mm ²)	206,6					206,6	n.a.	n.a.	
	Circonférence effective (mm)	51,0					51,0	n.a.	n.a.	
Armature courbe V-3x40 #5 section droite	Résistance en traction (Mpa)	400	414	404	380	413	402	13,8	370	400
	Dosage en fibre (% massique)	67,1	67,4	70,0			68	1,6	64	
	Tg (°C)	127	132	129	131	128	129	3,0	121	
	Absorption d'eau (‰)						n.a.	n.a.	n.a.	
	Diamètre effectif (mm)	19,4					19,4	n.a.	n.a.	
	Aire transversal (mm ²)	296,9					296,9	n.a.	n.a.	
	Circonférence effective (mm)	61,1					61,1	n.a.	n.a.	
Armature courbe V-3x40 #5 section droite	Résistance en traction (Mpa)	859	861	883	881	762	859	96,0	732	540
	Module d'Young (Gpa)	43	33	31			36	5,8	33	42
Armature courbe V-3x40 #6 section droite	Résistance en traction (Mpa)	846	882	883	863	879	871	18,7	834	530
	Module d'Young (Gpa)	32	36	32	37		34	2,8	33	39

Il est à noter que le coefficient d'adhérence, μ_a , est le même pour tous les types de renfort de Pultrall et qu'il respecte le requis du MTQ en maintenant une valeur de 0,8 max. En annexe, un document issu de recherche universitaire conduite à l'université de Sherbrooke atteste de cette affirmation.

Bernard Drouin
Directeur développement et procédé

Brahim Benmokrane
Professeur en génie civil, Université de Sherbrooke

ANNEXE E
FORMULE DE MÉLANGE ET CARACTÉRISTIQUE DU BÉTON

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

Contrat 3475-04-0203

FORMULE

BETON DE CIMENT-USINE BETON CHEVALIER ST-NICOLAS								
TYPE DE BETON	I	II	IV	V	VII	X	XI	XIII
TYPE DE CIMENT		Type 10E-SF		Type 10E-SF				Type 10E-SF
RÉSISTANCE EN COMPRESSION (MPa)		30		35				50
ÉPAISSEMENT (MM)		80		80				170
TAUX EN AIR (%)		5 à 8		5 à 8				5 à 8
APPORT E/C		0,45		0,44				0,38
ALIBRE GRANULAT		BC 5-20		BC 5-20				BC 5-14
TAUX DE BULLES D'AIR (MICRONS)		185		185				112
NNEE		2003		2003				2004
MASSE VOLUMIQUE (KG/M3)		2320		2295				2485
MASSE CIMENT (KG)		330		350				410
MASSE AJOUTS CIMENTAIRES (KG)								
MASSE EAU (KG)		150		150				155
MASSE GROS GRANULATS (KG)		1000		1000				1050
MASSE GRANULATS FINS (KG)		840		790				870
IDENTIFICATION ADJUVANT 1								Ret. 100XR
QUANTITE 1								500ml
IDENTIFICATION ADJUVANT 2		200-N		200-N				SPN
QUANTITE 2		550ml		750 ml				6000ml
IDENTIFICATION ADJUVANT 3		Micro-air		Micro-Air				Micro-air
QUANTITE 3		150ml		125 ml				145ml
NNEE		2004		2004				2004

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
 L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

CIMENT ET AJOUTS

BETON DE CIMENT-USINE BETON CHEVALIER-ST-NICOLAS									
TYPE DE BÉTON	I	II	IV	V	VI	VII	VIII	X	XIII
TYPE DE CIMENT		10E-SF		10E-SF					Type 10E-SF
PROVENANCE		St-Basile		St-Basile					St-Basile
IDENTIFICATION DE LA CIMENTERIE		Ciment Québec		Ciment Québec					Ciment Québec
TYPE D'AJOUT CIMENTAIRE									
CLASSE									
PROVENANCE									
ÉPÉES PRÉVUS									
ANNÉE		2004		2004					2004

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

GROS GRANULATS

BETON DE CIMENT-USINE BETON CHEVALIER ST-NICOLAS							
CALIBRE	BC 5-20	BC 5-14	BC 5-14	BC 2,5-10			exigences
PROVENANCE	Carrière Sartigan						
GRANULOMETRIE	C						
TAMIS 28 MM (% PASSANT)	100						
TAMIS 20 MM (% PASSANT)	99						
TAMIS 14 MM (% PASSANT)	21						
TAMIS 5 MM (% PASSANT)	2						
TAMIS 2,5 MM (% PASSANT)	1						
TAMIS 1,25 MM (% PASSANT)							
REACTIVITE-ALCALIS	NR 2003						MAX: C
LOS ANGELES	10,8						MAX: 50
MICRO DEVAL	10,2						MAX: 25
FRAGMENTATION (%)	100						MIN: 60
PARTICULES PLATES (%)	9,9						MAX: 25
PARTICULES ALLONGEES (%)	29,8						MAX: 45
PROPRETE (%)	0,69						MAX: 1,5
PARTICULES LEGERES (%)	0						MAX: 0,5
TENEUR MOTTES D'ARGILE (%)							MAX: 0,25
MgSO4 (%)	0,3						MAX: 12
MASSE VOLUMIQUE PILONNEE A SEC (KG/M3)	1612						
DENSITE RELATIVE BRUTE (SSS)	2,822						
ABSORPTION (%)	0,49						
ANNEE	2003						

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

GRANULATS FINS

BETON DE CIMENT-USINE BETON CHEVALIER ST-NICOLAS			
CALIBRE	BC 80microns-5	BC 80microns-5	EXIGENCES GRANULO.
PROVENANCE	Grav. De Beauce		
GRANULOMETRIE (C/NC)	C		
TAMIS 10 MM (% PASSANT)	100		100
TAMIS 5 MM (% PASSANT)	99		95-100
TAMIS 2,5 MM (% PASSANT)	83		80-100
TAMIS 1,25 MM (% PASSANT)	66		50-90
TAMIS 630 MICRONS (% PASSANT)	48		25-65
TAMIS 315 MICRONS (% PASSANT)	25		10-35
TAMIS 160 MICRONS (% PASSANT)	7		2,0-10
MICRO DEVAL	20,7		MAX: 35
PARTICULES LEGERES (%)	0		MAX: 0,5
INDICE COLORIMETRIQUE	0		MAX: 3
PROPRETE (%)	2,7		MAX: 3
MODULE DE FINESSE	2,7		2,3 à 3,1
TENEUR EN MOTTES D'ARGILE (%)	0,7		MAX: 1
MgSO4 (%)	13,4		MAX: 12
MASSE VOLUMIQUE PILONNEE A SEC (KG/M3)			
DENSITE RELATIVE BRUTE (SSS)	2,623		
ABSORPTION (%)	1,1		
ANNEE	2004		



*dossier
PSS, a.c.*
1054, boul. Saint-Joseph,
Québec (Québec) G2K 1E6
Tél. : (418) 634-1807
Télec. : (418) 628-3768



TRANSMISSION PAR TÉLÉCOPIEUR

Date : 26-08-2004

Destinataire : NTQ

Fax no. : (418) 839-7768

A l'attention de : *Yvan Bilodeau*
cc Pierre Roy

Objet : Pont autoroute 20 et rlv. Henri Val-Alain (3475-04-0203)

Nombre de page(s), incluant celle-ci : 3

Bonjour,

*Vous trouverez ci-joint les résultats du
résau de bulle d'air et des résultats en
compression pour le béton BHP*

*Je vous aises que nous prévoyons retourner
la cote aux I demain matin e 7h30
27-08-2004*

Bien à vous
CONSTRUCTION GÉNIX INC

Sylvain Roy
Sylvain Roy
Gérant de chantier

Titulaire d'une licence délivrée en vertu de la loi
sur le Bâtiment du Québec No. 8295-7168-21

AUG-26-2004 08:58 AM 286 BÉTON CHEVALIER INC. 418 848 4431 50:01 0002-80-92 P.02

	F-11.7 PRÉLEVEMENT D'ÉCHANTILLON, ESSAIS EN COMPRESSION, CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE
	? 1 ^m sur air 7.5/4.6

USINE: ST-Nicolas	DATE: 04-08-19
PROJET: Essai de Compress	N/Réf.:
ENDROIT:	N/Prélèvement: BC 204-G-3

Date du bétonnage: 04-08-19	EXIGENCES
Entrepreneur:	No recette: BC 50ASF
Partie(s) bétonnée(s):	Classe de béton: 50
	Affaissement exigé: 180±20
Prélèvement effectué par: M.V.	Air entrainé exigé: 5±8
Dimension des éprouvettes: 100mm x 200mm	Agrégat max. (mm): 14.5
Éprouvettes reçues au lab.:	Chauffage à l'usine:

Carton no.	Pasture no.	Chauffage	Hrs de départ	Hrs de prélév.	Classe de béton	Agrégats max.
			8:35	9:05	50	14.5
Affaissement	Air entrainé %	Temp. béton	Temp. amb.	Temp. ext.	A. a. s. (dispensé)	Autres adjuvants
180	9.5/77	25.6	22			

Éprouvette no.	Date	Age de l'essai	Masse volumique	Charge (kg)	Rés. en compression	Moyenne (MPa)
	20/8	1				21.21
	22/8	3				30.21
	24/8	5				35.16
	26/8	7				40.6
	2/9	14				

CALCUL DE LA MASSE VOLUMIQUE

Masse de la mesure avec béton: _____ kg

Masse de la mesure: _____ kg

Masse du béton: _____ kg

Coefficient de la mesure: 1 = Masse volumique de béton: _____ kg/m

9/9 21

Masse volumique théorique: _____ kg/m

16/9 28

± 40 kg

Rédigé par: 16/9	Approuvé par:	Date de mise en vigueur:
------------------	---------------	--------------------------

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

AUG-26-2004 08:58 AM BETON CHEVALIER INC. 410 640 4431 P0:01 P002-00-92 P.01



Laboratoire de matériaux de Québec (LPMQ) Inc.

CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU DE VIDES D'AIR
ASTM C-487
MÉTHODE DE COMPTAGE PAR POINT 1 (méthode B)

Cliant: Béton Chevalier Inc. 575, chemin de la Grande-Ligne Stanstead (Québec) G0A 4P0 À l'attention de monsieur Bernard Chevalier	Dossier no: 74-3186 503 Rapport no: R04-22x Date: 2004-08-26
---	---

CARACTÉRISTIQUES	
Identification Laboratoire no: 601 Projet: Essai de convenance Béton: 60 MPa SF Ech: 204-633, prêt: 2004-8-18 Usine: St-Nicolas Réception: 2004-08-23	Échantillon Type: cylindre: 100 x 200 Dimension maximale du granulat: 14mm Dimensions des plaques: 100 mm X 100 mm

RÉSULTATS		
Caractéristiques des éprouvettes	Valeurs calculées	Facteur d'espacement (C)
Longueur de traversée (T)	2448 mm	Exigences: 325 µm max. à BHP Valeur mesurée: 212 µm
Surface couverte	8180 mm ²	
Nombre d'arrêt (S)	1920	
Teneur en air (A)	5.5%	
Vides (n)	0.33	
Surface volumique (α)	23.84 mm ⁻¹	
Rapport pâte/air (P/A)	6.03	
REMARQUES		
Les deux plaques sont polies et sciées perpendiculairement à la surface.		

Préparé par: Patrick Plamondon	Approuvé par:  Patrick Plamondon, tech. princ.	Date: 26/08-26
--	---	-----------------------

22:00 10/08/04 20/08/04 265

410-659-3311 LPMQ INC. 1102-655-817



575, de la Grande Ligne, C.P. 219
Stonham (Québec) G0A 4P0

Usine Québec : (418) 848-1966
Usine St-Nicolas : (418) 831-0004
Usine Princeville : (819) 364-6010
Usine Beauveville : (418) 774-4747
Usine Thetford Mines : (418) 332-2177
Télécopieur : (418) 848-4431

Télécopie

3475-04-0203

Destinataire: Pierre Roy Expéditeur: Michel

Télécopie: 1-418-839-7768 Page(s): 1

Téléphone: Date: 04-09-20

Objet: Projet pont Val-Alain

☐ Soumission ☐ Liste de prix ☐ Ouverture de compte ☐ Réponse ☐ Confidentiel

• Commentaires:

- Essai de teneur en air effectué sur un béton 50MPa sans ajut d'air = 2.9%

- Air entraîné qui se perdait lors du pompage.

- Augmentation de l'air à 10% avant la pompe.

En cas de problème de transmission, veuillez nous en informer par téléphone au (418) 848-1966.

SEP-27-2004 03:21 PM BÉTON CHEVALIER INC.

418 848 4431

P.01

Yvan Bilodeau

*Refusé. Bilodeau
04-09-20*

3475-24-0203



575, de la Grande Ligne, C.P. 219
Stoneham (Québec) G0A 4P0

☐ Usine Québec : (418) 848-1986
☒ Usine St-Nicolas : (418) 831-0004
☐ Usine Princeville : (819) 364-6010
☐ Usine Beauceville : (418) 774-4747
Télécopieur : (418) 848-4431

Le 27 sept 2004

CONTRAT : Const. Génix inc.

PROJET : Val-Alain

Madame, Monsieur,

Voici tel que demandé, la formule de mélange de béton préparé devant servir pour le projet mentionné en titre.

Béton: prise rapide

- résistance en compression à 28 jours	50 Mpa type 13
- rapport E/c	0.37
- affaissement	170 mm $\pm$ 30
- pourcentage d'air entraîné	5 à 8 %
- calibre du granulat	5-14 mm

Mélange :

1 mètre cube : - ciment type 10 sf	410 kg
- sable	870 kg
- pierre	1 050 kg
- 100 xr	500 ml
- micro-air	165 ml
- SPN	6000 ml
- Eau	155 l
- pozzotech 20	1500ml

Fournisseurs :

- ciment type 10 sf portland	Ciment Québec
- adjuvants	Master Builders
- agrégats	Gravière de Beauce et Carrière Ray-Car

Nous espérons le tout à votre entière satisfaction et vous prions d'agréer, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

Par :

Benoit Lemelin

Benoit Lemelin, directeur de la production et des ventes

Ministère
des Transports

Québec



Direction de la Chaudière-Appalaches

*Dossier
A11-2002
73*

Saint-Romuald, le 17 décembre 2004

Monsieur Yvan Bilodeau, ing.
Service des projets
Direction Chaudière-Appalaches
1156, boul. de la Rive-Sud
Saint-Romuald (Québec)
G6W 5M6

OBJET : Rapport final – Lots en béton de ciment pour construction d'une structure
Contrat no : 3475-04-0203
Route : 20
Municipalité : Val-Alain
MRC : Lotbinière
Entrepreneur : Construction Génix inc.
Fournisseur : Béton Chevalier, St-Nicolas

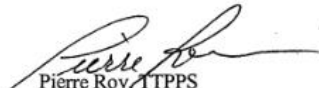
Monsieur,

Vous trouverez ci-jointe la compilation sous forme de lots des essais en résistance en compression en béton de ciment concernant la construction de la structure.

- Béton de type II (30 MPa)	Lot 1 : PR = 1,00 PU
- Béton de type V (35 MPa)	Lot 1 : PR = 1,00 PU
- Béton de type XIII (50 MPa)	Lot 1 : PR = 1,00 PU
	Lot 2 : PR = 1,00 PU

Espérant le tout à votre entière satisfaction, nous demeurons disponible pour de plus amples informations.

Salutations distinguées.


Pierre Roy, TTPPS
Secteur Assurance de la qualité

/dc

c.c. : M. Robert Brochu, ing., chef du Service des projets
M. Gilles Dussault, ing.
Dossier contrat

P.j.

1156, boulevard de la Rive-Sud
Saint-Romuald (Québec) G6W 5M6
Téléphone : (418) 839-5581
Télécopieur : (418) 834-7338
www.mta.gouv.qc.ca

BC-4

65

66

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

[illegible]

ANNEXE F
RAPPORT EXAMEN PÉTROGRAPHIQUE



MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

**Examen pétrographique sur carotte de béton
Structure P-11591 – Val-Alain**

Rapport final

Date : Septembre 2015
N/Réf. : 072-P-0008136-0-01-501-IM-R-0003-00





englobecorp.com

Le 28 septembre 2015

Monsieur Marc-Antoine Loranger, ing. jr
Ministère des Transports du Québec
Secteur béton
Service des matériaux d'infrastructure

Objet : **Examen pétrographique sur carotte de béton**
Structure P-11591 –Val-Alain
Rapport final
N/Réf.: 072-P-0008136-0-01-501-IM-R-0003-00

Monsieur,

Nous avons le plaisir de vous transmettre ci-joint le rapport final de l'examen pétrographique sur les carottes de béton de la structure P-11591 située à Val-Alain.

Nous espérons que les informations contenues dans ce rapport sauront vous être utiles. N'hésitez pas à communiquer avec nous pour toute question concernant cette étude.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

EnGlobe

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Sofie Tremblay", written over the EnGlobe logo.

Sofie Tremblay, géo. M. Sc
Péetrographe et chargée de projet

ST/AM/vb

p.j.

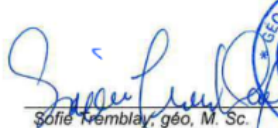


MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC

**Examen pétrographique sur carotte de béton
Structure P-11591
Val-Alain**

**Rapport final
072-P-0008136-1-01-501-IM-R-0003-00**

Préparé par :


Sofie Tremblay, géo, M. Sc.
Chargée de projet - Pétrographe
N° de membre OGQ : 1776

Approuvé par :


Alexis Mailloux, ing.
Chef d'équipe - Expertise
N° de membre OIQ : 143768



TABLE DES MATIÈRES

1 MANDAT..... 1

1.1 Limites de la caractérisation 1

2 OBSERVATIONS PÉTROGRAPHIQUES 2

2.1 Description générale du béton..... 2

3 CONCLUSION..... 5

FIGURES

Figure 1 : Plaque polie de la carotte C1 2

Figure 2 : Microphotographies des granulats du béton 4



Propriété et confidentialité

« Ce document d'ingénierie est la propriété d'EnGlobe Corp. et est protégé par la loi. Ce rapport est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute reproduction ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite d'Englobe et de son Client.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants d'Englobe qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment qualifiés selon la procédure relative à l'approvisionnement de notre manuel qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS		
N° de révision	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
0A	2015-09-25	Rapport pour commentaires
00	2015-09-28	Rapport final



1 MANDAT

Les services d'Englobe ont été retenus par le Ministère des Transports du Québec afin de réaliser un examen pétrographique sur une carotte de béton provenant de la structure P-11591 située à Val-Alain.

L'objectif de l'expertise est de déterminer la nature pétrographique des granulats présents dans le béton de la structure.

1.1 LIMITES DE LA CARACTÉRISATION

Les commentaires et observations de ce rapport sont basés sur l'analyse pétrographique effectuée selon les normes CSA A23.2-15A et ASTM C295. Toutes les identifications ont été faites au moyen de techniques de diagnostic visuelles normalisées et géologiques de base. Les conclusions sont donc une opinion professionnelle tenant compte des résultats d'un examen visuel, de l'expérience acquise par histoires de cas ainsi que de l'état actuel de la pratique. Il est à noter qu'aucune lame mince n'a été réalisée.



2 OBSERVATIONS PÉTROGRAPHIQUES

2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU BÉTON

Les observations pétrographiques ont été réalisées sur la carotte C1. Pour réaliser les observations, l'échantillon a été taillé à l'aide d'une scie diamantée. Ensuite, la surface de la section obtenue a été graduellement polie à l'aide d'une polisseuse portative utilisant des disques dont les particules abrasives sont de plus en plus fines.

La section polie provenant de la carotte de béton prélevée sur la structure est présentée à la Figure 1.



Figure 1 : Plaque polie de la carotte C1



Les granulats grossiers présents dans le béton se composent de particules concassées de roche de nature basaltique. La forme des particules est angulaire à subangulaire. Le diamètre maximal du gros granulat est de 14 mm. La couleur des particules est verte et rouge selon le niveau d'altération de l'hématite présente dans les granulats. La pierre contient fréquemment des amygdales remplis de calcite cristalline. La dureté des granulats est moyenne (≈ 4 à 5^*) et l'agencement des grains est cohésif (bonne ténacité). L'enrobage et la distribution des granulats dans le béton sont bons. La Figure 2 présente des microphotographies des granulats présents dans le béton.

Le granulat fin se compose d'un sable de nature quartzo-feldspathique. La forme des particules de sable est subarrondie à arrondie. Le diamètre maximal du sable est d'environ 5 mm. On retrouve parfois des particules de dimension supérieure.

La pâte de ciment a une couleur gris moyen laissant présager l'utilisation d'ajouts cimentaires dans le béton. Celle-ci présente quelques vides d'air uniformément répartis dont le diamètre maximal est d'environ 3 mm. Quelques vides de compaction d'une dimension maximale de 9 mm ont également été observés.

Aucun indice de détérioration n'a été observé dans le béton.

* Sur l'échelle de Mohs qui compte dix niveaux de dureté de 1=faible dureté (talc) à 10=grande dureté (diamant)

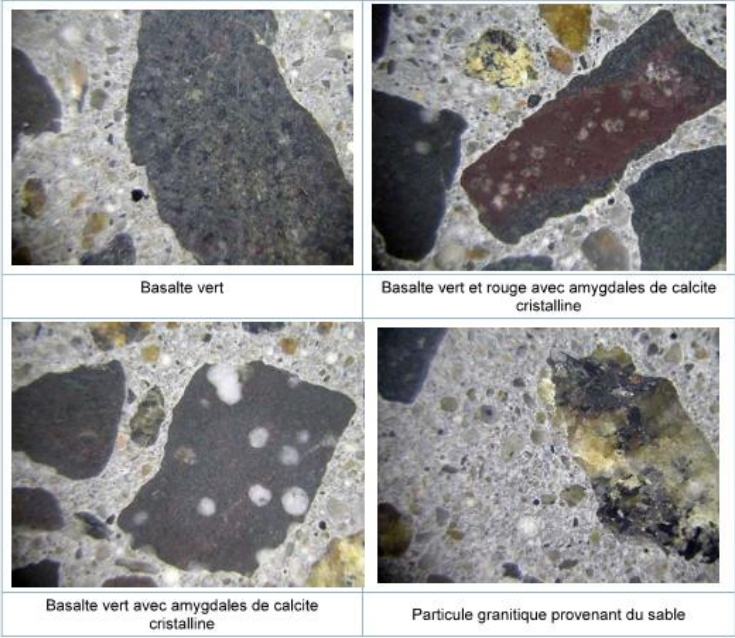


Figure 2 : Microphotographies des granulats du béton



3 CONCLUSION

Les services d'Englobe ont été retenus par le Ministère des Transports du Québec afin de réaliser un examen pétrographique sur une carotte de béton provenant de la structure P-11591 située à Val-Alain.

L'objectif de l'expertise était de déterminer la nature pétrographique des granulats présents dans le béton de la structure.

Les granulats grossiers présents dans le béton se composent de particules concassées de basalte vert et rouge.

Le granulat fin se compose d'un sable de nature quartzo-feldspathique.

Aucun indice de détérioration n'a été observé dans le béton.

FIN DU RAPPORT

ANNEXE G
RÉSULTATS DES ESSAIS

[illegible]

Transports Québec Service des Matériaux d'Infrastructures Secteur Liants hydrocarbonés et Chimie	Rapport d'essais Chlorure dans le béton de ciment	FS-35-53-201 Révision : 2 Page 1 de 1 2015-03-23
---	--	---

Type d'échantillon :	Béton	Numéro du rapport :	C1109-15
Client :		Provenance :	Val-Alain
Bon de commande :		Numéro d'échantillon :	BC-15-095
Échantillonneur :	Pascale Larouche	Date de réception :	2015-09-02
Date d'échantillonnage :	2015-09-02	Analyste (s) :	Nadia Verret

Teneur en ions chlorure solubles à l'acide (%)		
AASHTO T 260		
Échantillon	Profondeur (mm)	Chlorure (%)
BC-15-095 Carotte C-1	0-12,5	0,60
BC-15-095 Carotte C-1	12,5-25	0,15
BC-15-095 Carotte C-1	25-50	0,039
BC-15-095 Carotte C-2	0-12,5	0,33
BC-15-095 Carotte C-2	12,5-25	0,075
BC-15-095 Carotte C-2	25-38	0,028
BC-15-095 Carotte C-3	0-12,5	0,38
BC-15-095 Carotte C-3	12,5-25	0,14
BC-15-095 Carotte C-3	25-50	0,021
BC-15-095 Carotte C-3	50-56	0,017

Copie à : Pascale Larouche	Préparé par : Claudine Rousseau
	Approuvé par : 
	Date : 2015-09-11

Les résultats ne se rapportent qu'à l'échantillon soumis à l'essai.

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, sinon en entier, sans la permission écrite du Laboratoire des chaussées



2700, rue Ennema
Sainte-Foy (Québec) G1P 3P9
Téléphone : (418) 844-0181
Télécopieur : (418) 844-0892
www.mls.gouv.qc.ca



Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-35-S2b-132	Révision : 1 Date de révision : 2015-03-09
---	----------------------	---

**Détermination de la teneur en eau, de la masse volumique, de l'absorption et des vides
d'air dans le béton, le coulis ou le mortier
CSA A23.2-11C**

BC-15-095	Date : 8 sept. 2015
------------------	---------------------

Détails
 Client : Carottage P-11591 Val-Alain
 # client :
 Projet :
 Produit :
Échantillons
 Date de coulée :
 Date de prélèvement : 2015-07-13 Âge de l'échantillon :
 Lieu de prélèvement : P-11591 Val-Alain

Résultats					
		A	B	C	
# Laboratoire		C1	C3		
Masses (g)	I -	Mo (Masse initiale)	1246,1	1140,4	
	A-	Masse sèche	1193,6	1101,0	
	B-	Masse humide / immersion	1253,3	1144,8	
	C-	Masse (SSS) après ébullition	1258,4	1146,3	
	D-	Masse dans l'eau après ébullition	724,6	680,8	
Calculs		Teneur en eau (%)	4,4	3,6	
		Absorption après immersion (%)	5,0	4,0	
		Absorption après immersion et ébullition (%)	5,4	4,1	
		Masse volumique à sec (kg/m³)	2236	2365	
		Masse volumique après immersion (kg/m³)	2348	2459	
		Masse volumique après imm. et ébullition (kg/m³)	2357	2463	
		Volume des vides perméables (%)	12,1	9,7	

Remarque :

Préparé par : Idir Benamara Date : 2015-09-18	Approuvé par : <i>Nadia Pouliot, ing.</i> Date :
--	---



325, rue de l'Éspinay
Québec, G1L 2J2
Téléphone: (418) 647-1402

**Paramètres du système de vides
d'air dans le béton durci
ASTM C457 Procédure B**

Client : Ministère des Transports du Québec	Dossier : P-0008136-0-01-500
Projet : Laboratoire des chaussées 2015 à 2018; Essais en	Réf. client :
laboratoire	731667
Endroit : Québec	Rapport n° : 21 Rév. : 0
	Page 1 de 1

ÉCHANTILLONNAGE

N° d'éch. LVM : 21	Date / heure de prélèvement : 2015-07-13 à :
N° d'éch. client : BC-15-095 C1	Prélevé par : le client
Type d'échantillon : Carotte de béton	Âge à l'essai : 49 jours
Plaque sciées et polies - Dimensions : 150 mm diam.	Endroit de prélèvement : P-11591; Val-Alain
Position :	

CARACTÉRISTIQUES DU MÉLANGE

N° de formule	Fournisseur	Usine
Résistance à 28 jours :	MPa	Type ou classe de béton :
Dimension maximale des granulats :	mm	
Liant (type, marque et provenance) :		
Granulat(s) fin(s) (provenance) :		
Adjuvants chimiques (types et sources) :		
Latex (source) :	Aucun	

PARAMÈTRES D'ESSAI

	Exigences	Utilisés
Surface (mm²)	7100 min.	11850
Longueur totale traversée (mm)	2286 min.	2398
Nombre d'arrêts	1350 min.	3200
Grossissement du microscope	50X min. - 125X max.	120 X

RÉSULTATS

Caractéristiques	Valeurs calculées
Pâte	29,4 %
Granulats	64,7 %
Teneur en air (A)	5,9 %
Surface volumique (α)	15,1 mm ⁻¹
Facteur d'espacement (l)	307 μ m

EXIGENCES

Norme CSA A23.1	
Individuelle : $\leq 260 \mu$ m	Moyenne : $\leq 230 \mu$ m
Tome VII du MTQ	
Tous les types : $\leq 230 \mu$ m	
Exceptions :	
Type XIV-S et XVI-15 : $\leq 300 \mu$ m	
Type XIII à la sortie de la pompe : $\leq 325 \mu$ m	
Type XIV-C et XIV-R à la sortie de la pompe : $\leq 260 \mu$ m	

REMARQUES

Le prélèvement et le transport de l'échantillon ont été effectués par un représentant du client. La plaque a été prélevée horizontalement sur la carotte.

Préparé par :
Asmae El Aychi, tech.
Date : 2015-08-31

Approuvé par :
Sofie Tremblay, géo. M. Sc.
Date : 11/09/2015

EQ-09-IM-109 rév. 08 (14-01)

Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-35-S2b-042	Révision : 0 Date de révision : 2013-08-02
---	----------------------	---

**Perméabilité aux ions chlorure
ASTM C 1202**

BC-15-095	Date : 9 sept. 2015
------------------	---------------------

Détails
 Client :
 # client :
 Projet : Carottage P-11591 Val-Alain

Échantillons
 Type d'échantillons : Carottes : ☒ Cylindre : ☐
 Date de coulée :
 Date de prélèvement : 13 juil. 2015 Type de cure :
 Date de réception : Lieu de prélèvement : P-11591 Val-Alain
 Produit :

Résultats d'essais (11 ans)

	Échantillon	
	C-1	
Section testée	Milieu	
Diamètre moy (mm)	101,0	
Hauteur moy (mm)	48,7	
Temp. maximale (°C)	24	
Charge non corr. (C.)	751	
Charge corrigée (C.)	664	
Charge moyenne (C.)	664	
Indice de perméabilité	Très faible	

Classification ASTM C 1202	
Charge (Coulombs)	Indice de perméabilité
> 4 000	Élevée
2 000 - 4 000	Modérée
1 000 - 2 000	Faible
100 - 1 000	Très faible
< 100	Négligeable

Courbe de l'évolution du courant

Temps (heures)	Courant (mA)
0	35
0.5	35
1	34
1.5	34
2	35
2.5	35
3	35
3.5	35
4	35
4.5	35
5	35
5.5	35
6	35

Remarque :

Préparé par : Dave Brindle, t.t.p. Date : 14 septembre 2015	Approuvé par : <i>Nadine Pouliot, ing.</i> Date : 16/09/2015
--	---

Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-35-S2b-042	Révision : 0 Date de révision : 2013-08-02
---	----------------------	---

**Perméabilité aux ions chlorure
ASTM C 1202**

BC-15-095	Date : 9 sept. 2015
------------------	---------------------

Détails
 Client :
 # client :
 Projet : Carottage P-11591 Val-Alain

Échantillons
 Type d'échantillons : Carottes : ☒ Cylindre : ☐
 Date de coulee :
 Date de prélèvement : 13 juil. 2015 Type de cure :
 Date de réception : Lieu de prélèvement : P-11591 Val-Alain
 Produit :

Résultats d'essais (11 ans)

	Échantillon	
	C-2	
Section testée	Milieu	
Diamètre moy (mm)	101,0	
Hauteur moy (mm)	52,0	
Temp. maximale (°C)	23	
Charge non corr. (C.)	492	
Charge corrigée (C.)	435	
Charge moyenne (C.)	435	
Indice de perméabilité	Très faible	

Charge (Coulombs)	Indice de perméabilité
> 4 000	Élevée
2 000 - 4 000	Modérée
1 000 - 2 000	Faible
100 - 1 000	Très faible
< 100	Négligeable

Courbe de l'évolution du courant

Temps (heures)	Courant (mA)
0	22
1	22
2	22
3	22
4	22
5	22
6	22

Remarque :

Préparé par : Dave Brindle, t.t.p. Date : 14 septembre 2015	Approuvé par : <i>Nadia Poulin</i> Date : 16/09/2015
--	---

Transports Québec Direction du Laboratoire des chaussées Service des matériaux d'infrastructures Secteur béton	FS-35-S2b-042	Révision : 0 Date de révision : 2013-08-02
---	----------------------	---

**Perméabilité aux ions chlorure
ASTM C 1202**

BC-15-095	Date : 9 sept. 2015
------------------	---------------------

Détails
 Client :
 # client :
 Projet : Carottage P-11591 Val-Alain

Échantillons
 Type d'échantillons : Carottes : ☒ Cylindre : ☐
 Date de coulée :
 Date de prélèvement : 13 juil. 2015 Type de cure :
 Date de réception : Lieu de prélèvement : P-11591 Val-Alain
 Produit :

Résultats d'essais (11 ans)

	Échantillon	
	C-3	
Section testée	Milieu	
Diamètre moy (mm)	101,0	
Hauteur moy (mm)	51,6	
Temp. maximale (°C)	22	
Charge non corr. (C.)	301	
Charge corrigée (C.)	266	
Charge moyenne (C.)	266	
Indice de perméabilité	Très faible	

Charge (Coulombs)	Indice de perméabilité
> 4 000	Élevée
2 000 - 4 000	Modérée
1 000 - 2 000	Faible
100 - 1 000	Très faible
< 100	Négligeable

Courbe de l'évolution du courant

Temps (heures)	Courant (mA)
0	14
0.5	14
1	14
1.5	14
2	14
2.5	14
3	14
3.5	14
4	14
4.5	14
5	14
5.5	14
6	14

Remarque :

Préparé par : Dave Brindle, t.t.p. Date : 14 septembre 2015	Approuvé par : <i>Nadia Pouliot, ing.</i> Date : 16/09/2015
--	--

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

 Service des matériaux et infrastructures Bureau Louis-Philippe et Christine	ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES BARRES D'ARMATURE EN MATÉRIAU COMPOSITE	FS-56-272 Page 1 de 1 Révision 1.0 2015-02-19
---	---	--

Type d'échantillon :	Barre d'armature en matériau composite	Numéro de rapport :	C1028-15
Échantillonneur :	Dave Brindley	Numéro de l'échantillon :	MC-15-001 Barre droite
Envoyé par :	Secteur béton de ciment	Date d'échantillonnage :	2015-02-20
Analyste(s) :	Maria Neira, Christine Duchesne, Nadia Vernet	Date de réception :	2015-02-20
		Fournisseur :	Pultrall

Identification	Masse volumique ¹⁾ ASTM D792 (g / mL)	Absorption d'eau ²⁾ ASTM D570 (%)	Porosité ³⁾ (Présence / Absence)	Tg ⁴⁾ ASTM D318 (°C)	Cure ⁵⁾ CSA S87 (%)	Composition chimique FRX (%) LC 31-305											
						Fibre ⁶⁾ ASTM D2584	Résine ⁶⁾	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	B ₂ O ₃ ⁷⁾
MC-15-001-1	2,06	0,05	P	116	96,4	78,4	21,6	54,5	22,9	13,7	0,39	0,89	0,09	0,54	0,30	< 0,01	6,7
MC-15-001-2	2,05	0,06	A	120	97,6	78,6	21,4										
MC-15-001-3	2,05	0,06	A	115	96,5	78,8	21,2										
Moyenne	2,05	0,06		117	96,8	78,6	21,4										

Remarques : 1) Masse volumique mesurée avec recouvrement de sable; 2) Moyenne d'un triplicata; 3) La mention P signifie qu'un moins un point a été observé sur au moins un des triplicatas après 15 minutes dans une solution 1% de fuchsine basique dans le méthanol; 4) Tg : température de transition vitreuse calculée à mi-hauteur; 5) Valeur calculée à partir d'une analyse de polymérisation de la résine pure de 257 J/g; 6) % rapporté sans tenir compte du sable, sur les fibres non-lavées; 7) B₂O₃ : teneur maximale estimée.

Copie à :	Marc-Antoine Loranger	Préparé par :	Claudine Rousseau
Date :	2015-03-24	Approuvé par :	 Christine Neira M.Sc., chimiste

Ce rapport est une propriété exclusive du client et ne peut être reproduit, diffusé ou utilisé, sans la permission écrite du Laboratoire des chaussées. Les résultats ne se rapportent qu'à l'échantillon soumis à l'essai.



EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

Projet Québec Services des matériaux et infrastructures Secteur Liens hydrauliques et Chemins										ANALYSES PHYSICO-CIMIQUES DES BARRES D'ARMATURE EN MATÉRIAU COMPOSITE										F5-35-S-272 Page 1 de 1 Révision 0 2015-03-19									
Type d'échantillon : Barre d'armature en matériau composite										Numéro de rapport : C1115-15																			
Échantillonneur : Marc-Antoine Lorranger										Numéro de l'échantillon : MC-15-008-1, -6 Barre courte																			
Envoyé par : Secteur béton de ciment										Date d'échantillonnage : 2015-09-25																			
Analyse(s) : Maria Neira, Christine Duchesne, Nadia Verret										Date de réception : 2015-09-25																			
										Fournisseur : Pultrall																			

Identification	Masse volumique ¹⁾ ASTM D792 (g / ml)	Absorption d'eau ²⁾ ASTM D570 (%)	Porosité ³⁾ (Présence / Absence)	Tg ⁴⁾ ASTM D2181 (°C)	Cure ⁵⁾ CSA S807 (%)	Composition par calcination (% p/p)		Composition chimique FRX (%)									
						Fibre ⁶⁾ ASTM D2584	Résine ⁶⁾	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	B ₂ O ₃ ⁷⁾
MC-15-008-1			Voir remarque 8)	91	95.1	68.8	31.2	54.0	22.8	13.7	0.32	0.89	0.07	0.53	0.27	< 0.01	7.3
MC-15-008-6	1.84	0.14															
Moyenne	1.84	0.14		91	95.1	68.8	31.2										

Remarques : 1) Masse volumique mesurée avec recouvrement de sable. 2) Moyenne d'un triplicata. 3) La mention P signifie qu'au moins un point a été observé sur au moins un des triplicatas après 15 minutes dans une solution 1% de fuchsine basique dans le méthanol. 4) Tg : température de transition vitreuse calculée à mé-talheur. 5) Valeur calculée à partir d'une enthalpie de polymérisation de la résine pure de 239 J/g. 6) % rapporté sans tenir compte du sable, sur les fibres non-lavées. 7) B₂O₃ : teneur maximale estimée. 8) La présence de trous a été observée visuellement sur ces échantillons (voir photos ci-jointes). Bien que des cavités soient présentes sur toute la longueur de ces échantillons, le colorant n'a pas traversé l'échantillon par capillarité lors de l'essai de porosité en raison du diamètre important de ces cavités (> 0.20 mm).

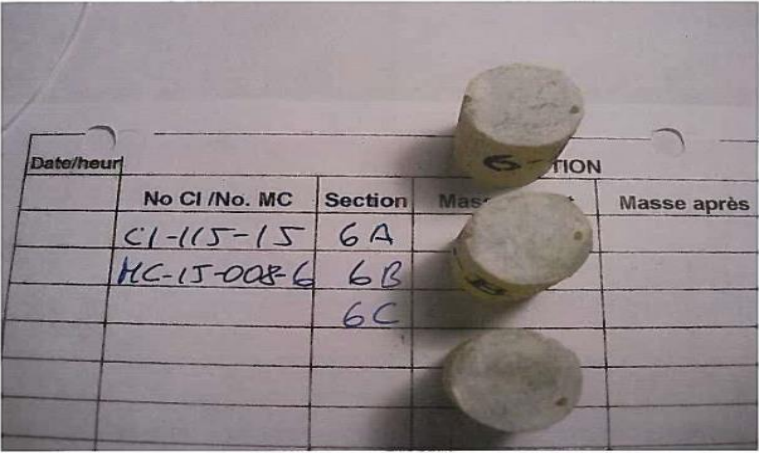
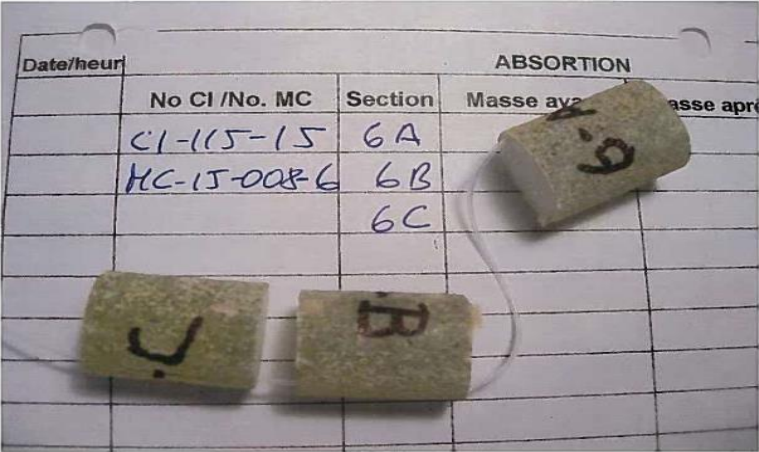
Copie à : Marc-Antoine Lorranger

Préparé par : Claudine Rousseau

Date : 2015-10-13

Approuvé par :  Christine Duchesne, M.Sc., chimiste

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, sans sa permission écrite de Laboratoire des chaussées. Les données ne se rapportent qu'à l'échantillon mentionné à l'essai.



EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN

 Québec Service des matériaux et infrastructures Ingénieur, Laboratoire hydrotechnique et chimie		ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES BARRES D'ARMATURE EN MATÉRIAU COMPOSITE															FR-35-43-272 Page 1 sur 1 Révision: 0 2015-03-19	
Type d'échantillon :		Barre d'armature en matériau composite																
Échantillonneur :		Marc-Antoine Lorranger																
Envoyé par :		Secteur béton de ciment																
Analyse(s) :		Marie Neira, Christine Duchesne, Nadia Veret																
Numéro de rapport :		CH116-15																
Numéro de l'échantillon :		MC-15-008-2, 3, 7 Barre droite																
Date d'échantillonnage :		2015-09-25																
Date de réception :		2015-09-25																
Fournisseur :		Pultrall																

Identification	Masse volumique ¹⁾ ASTM D792 (g / ml)	Absorption d'eau ²⁾ ASTM D578 (%)	Porosité ³⁾ (Porosité / Absence)	Tg ⁴⁾ ASTM D3111 (°C)	Cure ⁵⁾ CSA S887 (%)	Composition par calcination (% p/p)		Composition chimique FRX (%)									
						Fibre ⁶⁾ ASTM D2844	Résine ⁶⁾	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	B ₂ O ₃ ⁷⁾
MC-15-008-2	2,05	0,14				77,8	22,2	54,3	22,9	13,7	0,38	0,89	0,08	0,54	0,30	<0,01	6,8
MC-15-008-3			A	120	97,8												
MC-15-008-7				111	95,7			77,7	22,3	53,8	22,9	13,8	0,39	0,91	0,10	0,54	0,31
																	<0,01
																	7,1
Moyenne	2,05	0,14		116	96,8	77,8	22,2										

Remarques : 1) Masse volumique mesurée avec recouvrement de sable. 2) Moyenne d'un triplicata. 3) La mention P signifie qu'au moins un point a été observé sur au moins un des triplicatas après 15 minutes dans une solution 1% de fuchine basique dans le méthanol. 4) Tg : température de transition vitreuse calculée à mélanneur. 5) Valeur calculée à partir d'une enthalpie de polymérisation de la résine pure de 257 J/g. 6) % rapporté sans tenir compte du sable, sur les fibres non-lavées. 7) B₂O₃ : teneur maximale estimée.

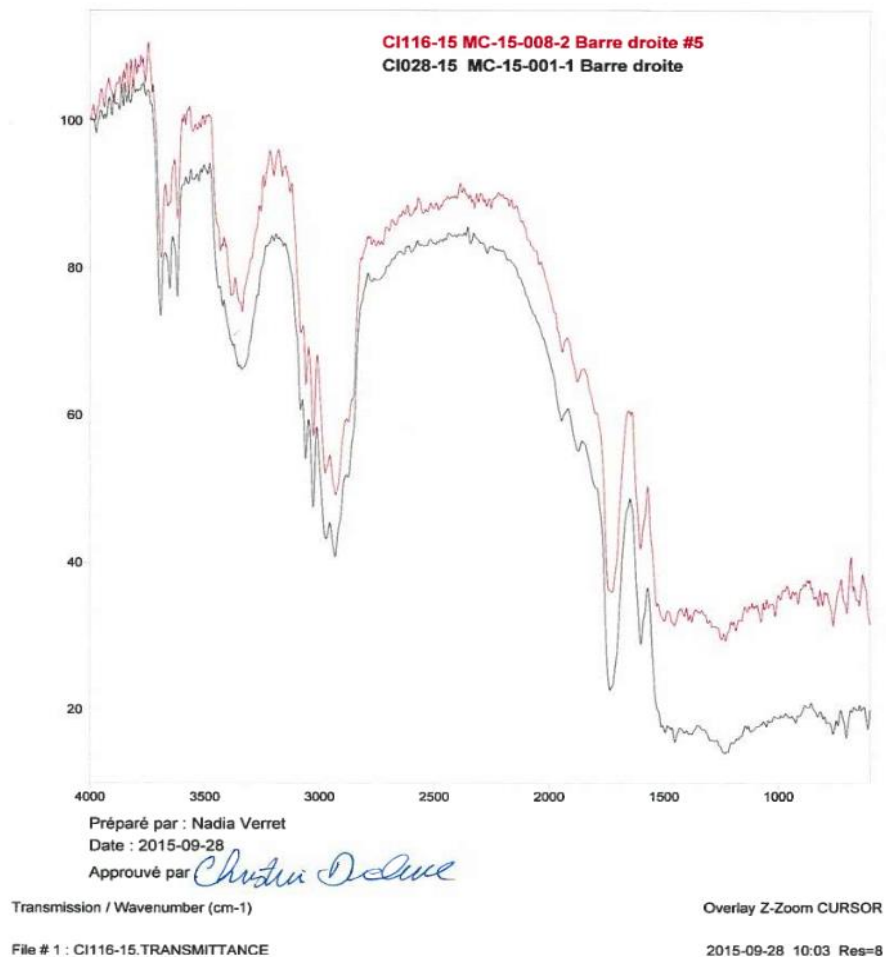
Copie à : Marc-Antoine Lorranger Préparé par : Claudine Rousseau

Date : 2015-10-13 Approuvé par : Aurélien D.

M.Sc., chimiste



EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



Transport Québec Service des matériaux et structures Service Laboratoire de Chimie		ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES DES BARRES D'ARMATURE EN MATÉRIAU COMPOSITE										F-353-372 Page 1 de 1 Révisé le 2015-05-19	
Type d'échantillon : Barre d'armature en matériau composite													
Échantillonneur : Marc-Antoine Lorranger													
Envoyé par : Secteur béton de ciment													
Analysés : Maria Neira, Christine Duchesne, Nadia Verre													
Numéro de rapport : C1117-15													
Numéro de l'échantillon : MC-15-008-4, 5 Barre courbe													
Date de réception : 2015-09-25													
Fournisseur : Pultrall													

Identification	Masse volumique ¹⁾ ASTM D792 (g / mL)	Absorption d'eau ²⁾ ASTM D578 (%)	Porosité ³⁾ (Présence / Absence)	Tg ⁴⁾ ASTM D3418 (°C)	Cure ⁵⁾ CSA S97 (%)	Composition par calcul (%, pp)		Composition chimique FRX (%)									
						Fibre ⁶⁾ ASTM D3841	Résine ⁶⁾	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO	B ₂ O ₃ ⁷⁾
MC-15-008-4	1.88	0.08		Entre 84 et 106	Entre 91.5 et 97.0	70.8	29.2	53.6	22.8	13.8	0.24	0.88	0.07	0.53	0.28	< 0.01	7.6
MC-15-008-5			P														
Moyenne	1.88	0.08				70.8	29.2										

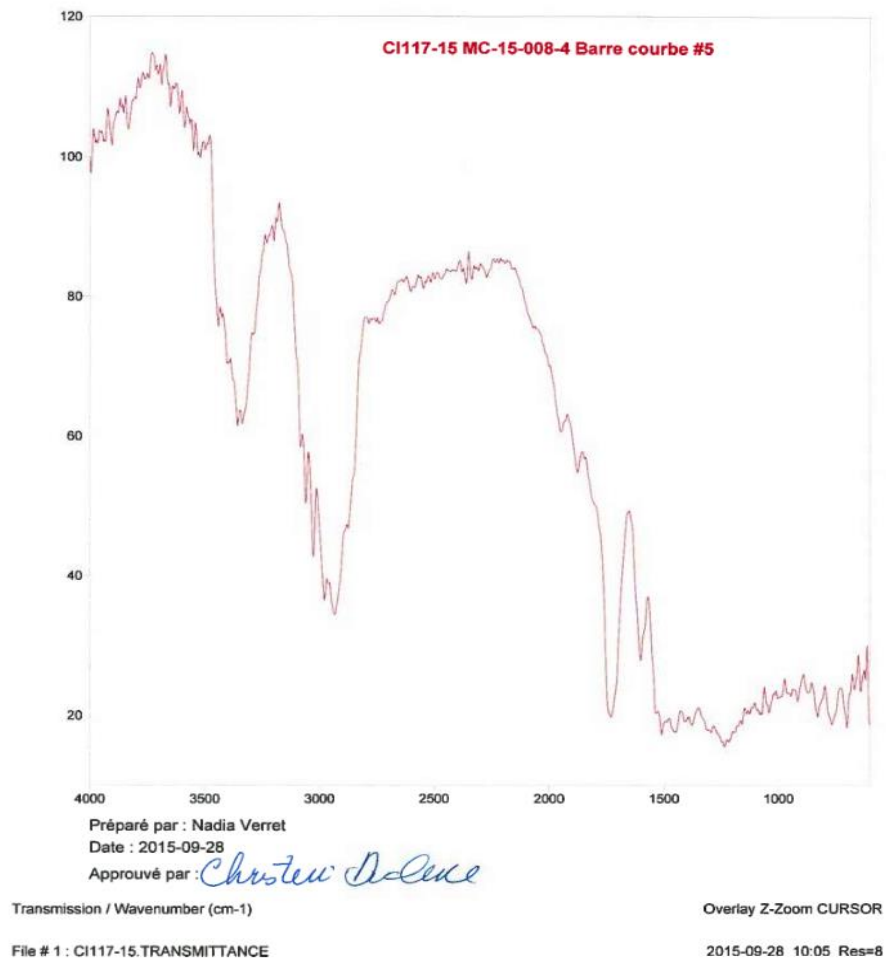
Remarques : 1) Masse volumique mesurée avec recouvrement de sable. 2) Moyenne d'un triplicata. 3) La mention P signifie qu'un moins un point a été observé sur au moins un des triplicats après 15 minutes dans une solution 1% de fuchsine basique dans le méthanol. 4) Tg : température de transition vitreuse calculée à mi-hauteur. 5) Valeur calculée à partir d'une enthalpie de polymérisation de la résine pure de 239 J/g. 6) % rapporté sans tenir compte du sable, sur les fibres non lavées. 7) B₂O₃ : teneur maximale estimée.

Copie à : Marc-Antoine Lorranger **Préparé par :** Claudine Rousseau

Date : 2015-10-13 **Approuvé par :** *Claude Rousseau* M.Sc., chimiste

Ce rapport est pour l'usage exclusif du client et ne peut être reproduit, diffusé en entier, sans la permission écrite de l'Administrateur des données. Les résultats ne se rapportent qu'à l'échantillon soumis à l'essai.

EXPERTISE SUR L'ÉTAT DU BÉTON ET DES BARRES D'ARMATURE EN PRFV DU PONT P-11591 SITUÉ SUR
L'AUTOROUTE 20 EST À VAL-ALAIN



ANNEXE H
RAPPORT D'ANALYSE PAR SPECTROSCOPIE DE RÉSONANCE
MAGNÉTIQUE NUCLÉAIRE DU ^{13}C EN PHASE SOLIDE

Université Laval, le 16 octobre 2015

**Rapport d'analyse RMN solide du ^{13}C de
deux échantillons de résine**

Remis à Madame Christine Duchesne
Ministère des Transports du Québec
Service des matériaux d'infrastructures
Secteur liants hydrocarbonés et chimie

Problématique :

Identification de la résine polymère de deux échantillons en poudre par comparaison avec deux échantillons standards, un de type polyester et un de type polyvinyle (ceux-ci ayant été enregistrés dans un contrat précédent, rapport du 27 mai 2015.)

Échantillons numéro : CI118-15 MC-15-008-6
CI119-15 MC 15-008-7

Méthode utilisée :

Spectroscopie RMN ^{13}C en phase solide

Détails expérimentaux :

Échantillon en poudre, tassé dans un rotor de 4 mm de diamètre. Les spectres ^{13}C en CP-MAS ont été enregistrés sur un spectromètre Bruker Avance 400 à une fréquence de 100 MHz, avec 10000 scans, à une vitesse de rotation de l'échantillon de 12 kHz, un délai de recyclage de 4 secondes, et un temps de contact de 2 ms.

Résultats et discussion:

Les spectres des deux nouveaux échantillons sont présentés à la figure 1, de même que les spectres de références précédemment enregistrés. Le tableau 1, donne les positions et l'attribution des pics principaux des nouveaux échantillons et la comparaison avec les standards précédemment enregistrés.

Trois pics sont caractéristiques des polyvinyliques : le pic vers 115-120 ppm et les deux petits pics vers 153 et 157 ppm, qui étaient faibles, mais présents dans le standard polyvinyle et absents du standard polyester, sont nettement présents. Les pics vers 170-176 ppm étaient aussi présents pour le standard polyester, mais on remarque qu'ils sont légèrement, mais systématiquement à plus haut déplacement chimique pour les polyvinyliques. Ils pourraient donc provenir de groupements chimiques différents selon la résine, en accord avec l'attribution proposée.

Conclusion :

Les deux nouveaux échantillons inconnus sont, d'après les caractéristiques observées en spectroscopie RMN, de la classe des polyvinyliques.



Josée Brisson, chimiste et Pierre Audet, chimiste
Département de chimie, Université Laval
1045 avenue de la Médecine
Québec, Québec G1V 0A6
Tél. : (418) 656-2131 poste 3536
Courriels : josee.brisson@chm.ulaval.ca, pierre.audet@chm.ulaval.ca

Tableau 1 : Positions principales des pics observés pour les échantillons inconnus et attribution chimique

Position de pics des inconnus (ppm)	Intensité relative	Attribution	Standard comprenant ce pic
9 et 18	+	C aliphatique (CH, CH ₂ , CH ₃)	Les deux
40-49	++	CH ₂ en bêta d'un groupe ester C en alpha de Cl, N ou F	Les deux
70	++	C-O de fonction éthers ou esters	Les deux
115-120	+	CF ₂	Standard polyvinyle
128-130	+++	C=C	Les deux
140-145	+	C=C	Les deux
153 et 157	+	C=C	Standard polyvinyle
170-176		Carbone de fonction ester ou acide	Les deux

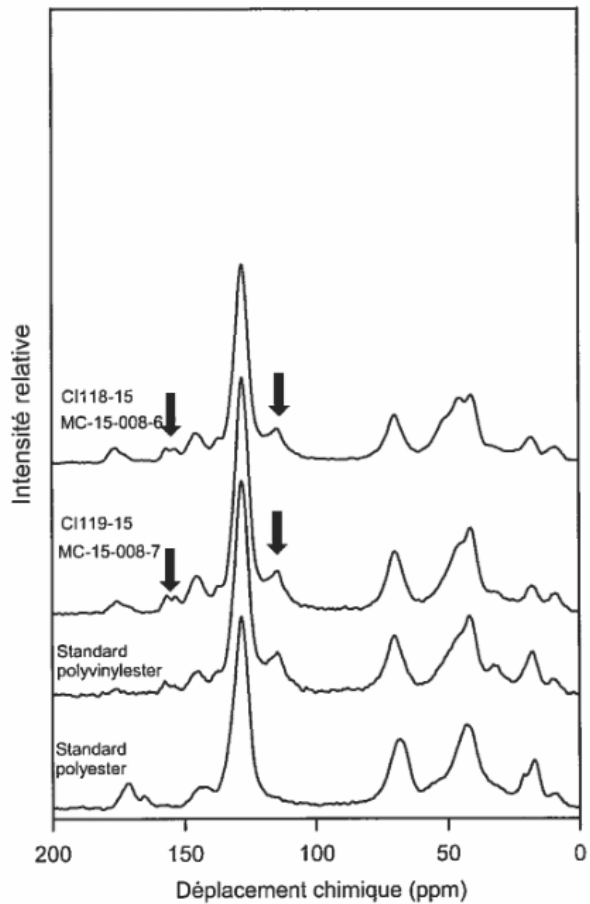


Figure 1 : Spectres RMN ^{13}C en phase solide des échantillons de résine. Les flèches bleues indiquent les pics caractéristiques des polyvinylyes

ANNEXE I
PHOTOGRAPHIES MEB

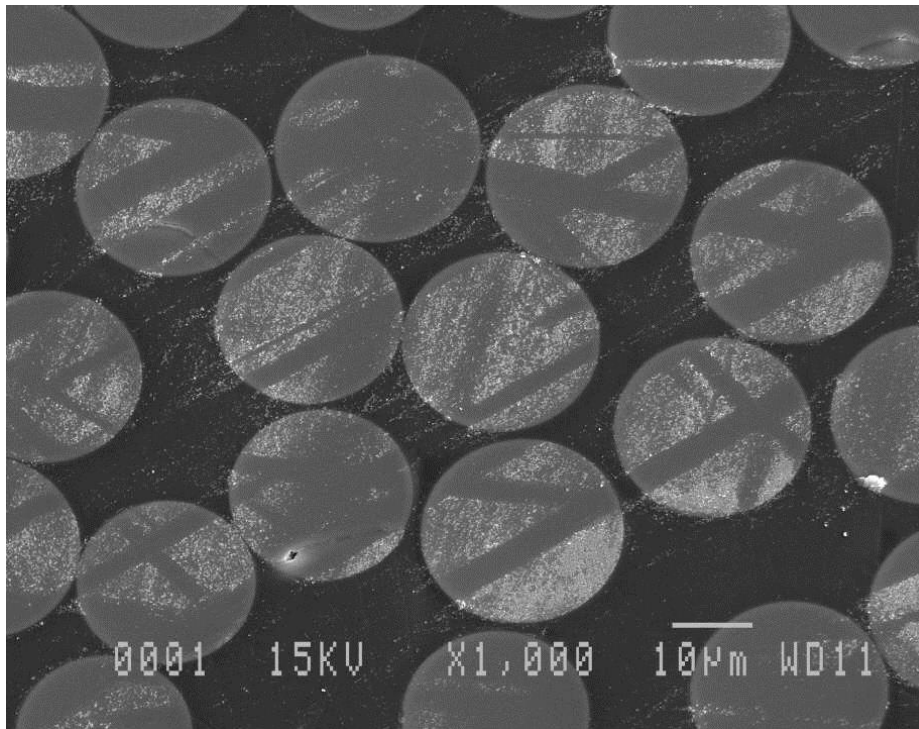


Photo 1 – Barre courbe MC-15-008-6 (artefacts de polissage visibles)

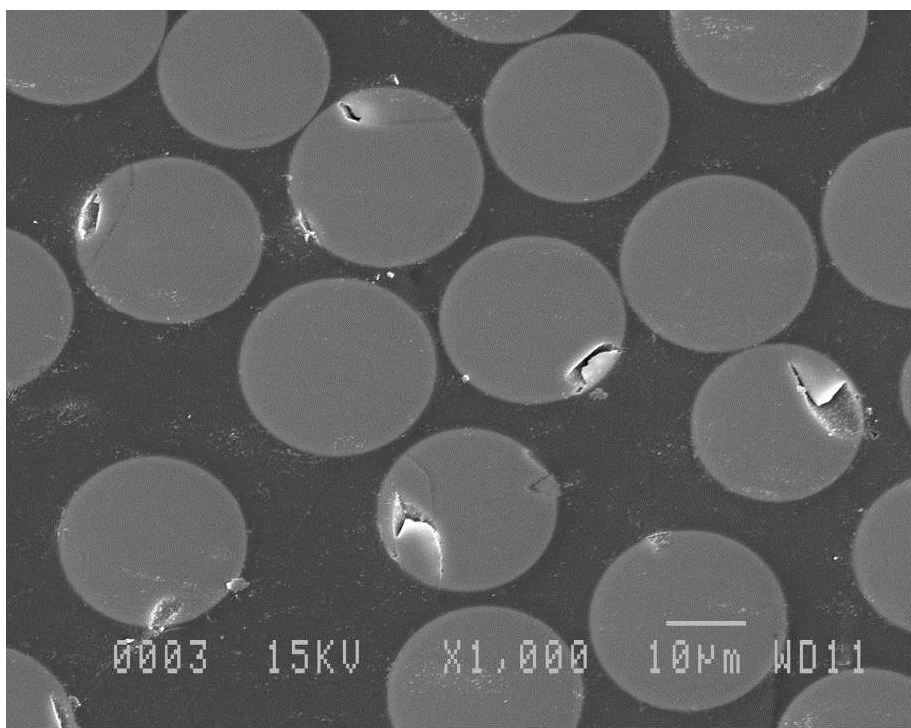


Photo 2 – Barre courbe MC-15-008-6

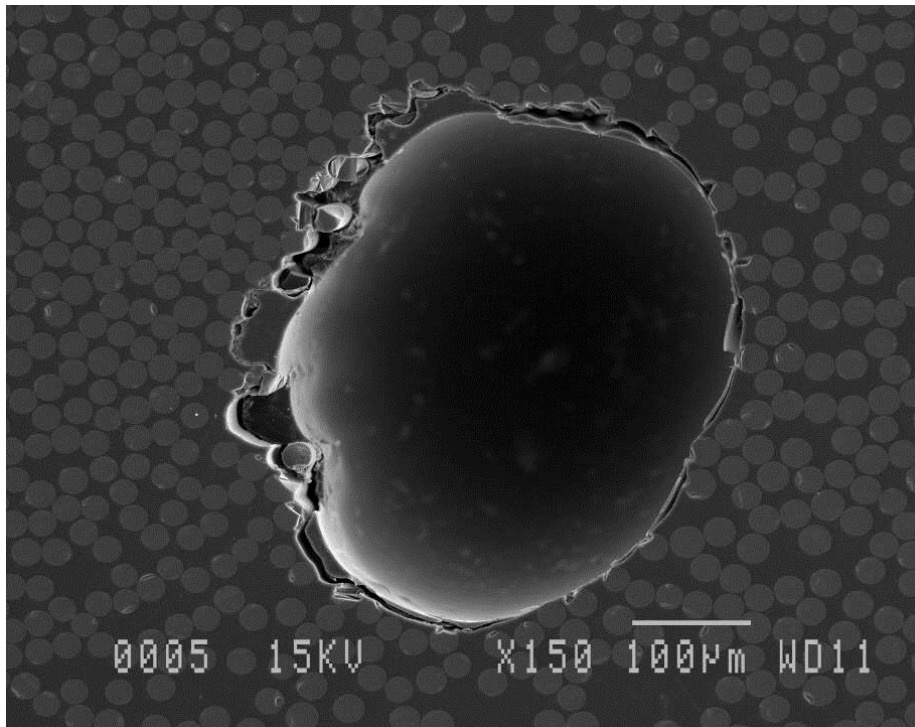


Photo 3 – Porosité de la barre courbe MC-15-008-6

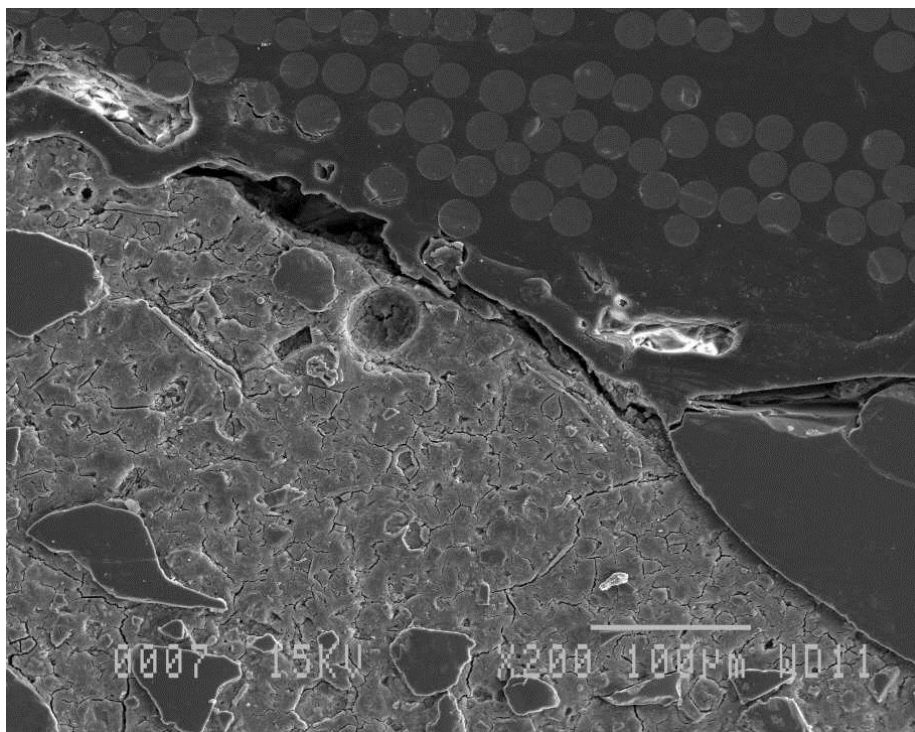


Photo 4 – Interface composite-béton de la barre courbe MC-15-008-6

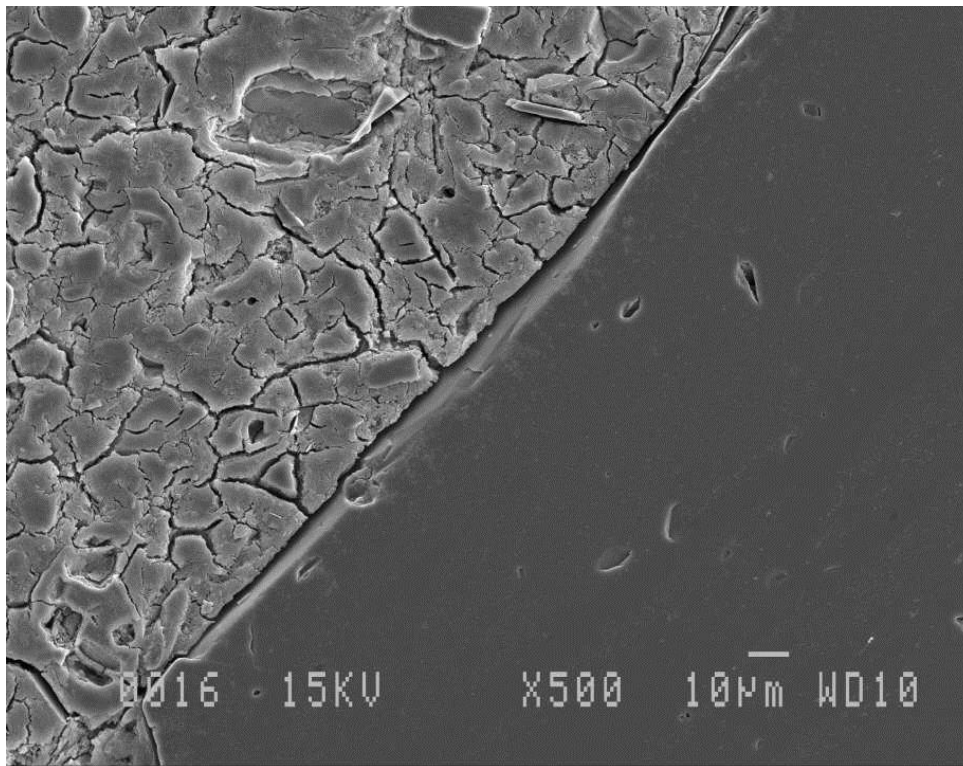
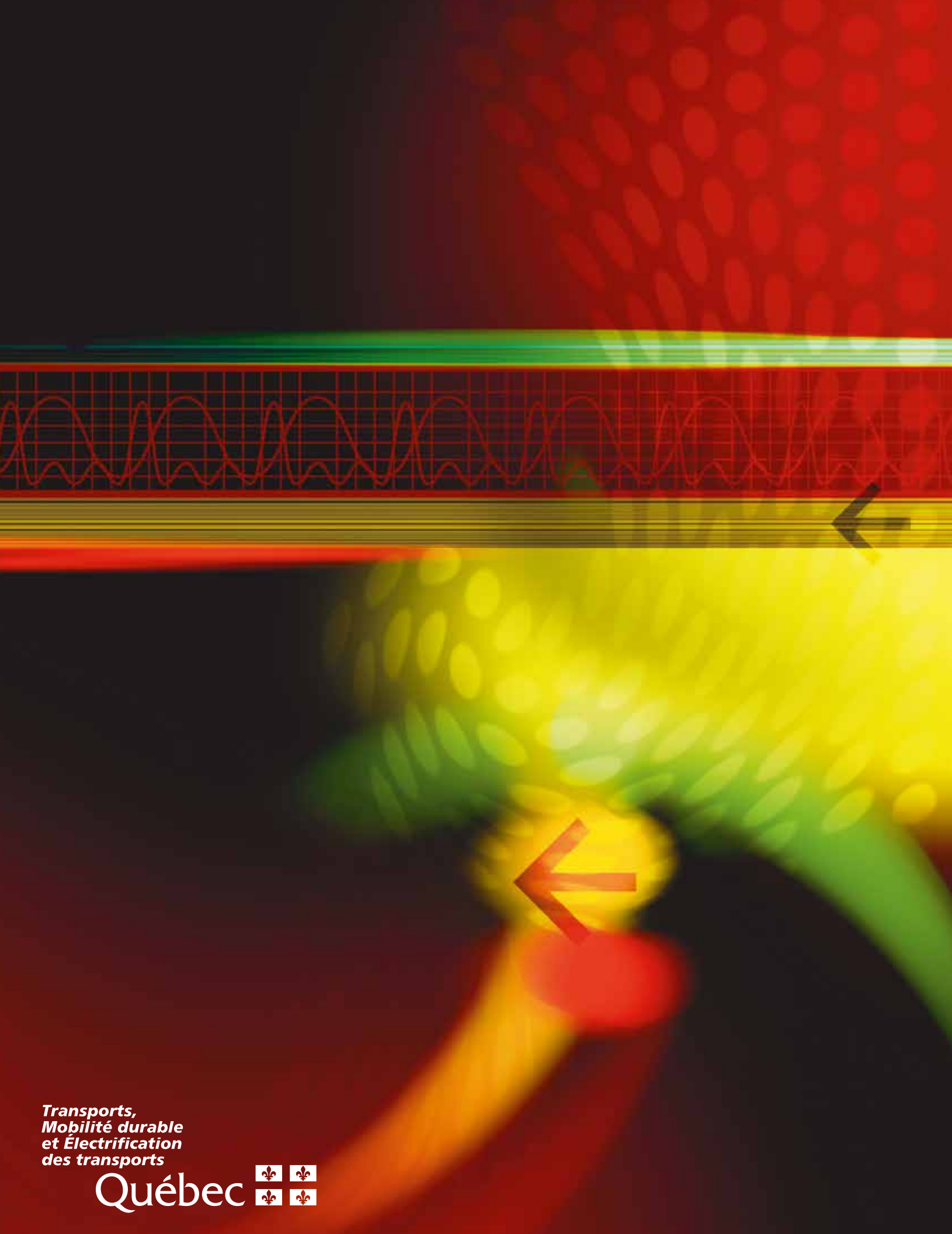


Photo 5 – Interface composite-béton de la barre droite MC-15-008-7



*Transports,
Mobilité durable
et Électrification
des transports*

Québec  