



Montréal, Québec  
May 29 to June 1, 2013 / 29 mai au 1 juin 2013

## Conception, construction et monitoring d'une dalle de grande dimension en béton armé de polymères renforcés de fibre (PRF)

M-C. B. Michaud<sup>1</sup>, H. M. Mohamed<sup>2</sup>, B. Benmokrane<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Étudiante à la maîtrise, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

<sup>2</sup> Chercheur postdoctoral, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

<sup>3</sup> Professeur titulaire, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.

**Résumé :** Les problèmes majeurs de détériorations de la dalle du quai de déchargement à l'incinérateur de la ville de Québec ont menés à la réfection complète de l'ouvrage. Ce dernier est constitué d'une dalle de béton unidirectionnelle ayant une surface approximative de 1300 mètres carrés. Dans le cas présent, l'utilisation de barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) a représenté une solution de substitution des barres d'armature en acier. Cet article présente alors un résumé des critères utilisés lors de la conception, des détails de construction ainsi que du monitoring réalisé. Enfin, une discussion des résultats préliminaires sur le comportement en service des PRFV, sous des sollicitations environnementales particulières et sous des charges importantes, sera présentée.

### 1 Introduction

Actuellement, l'ensemble des ouvrages d'art en béton armé au Québec, tout comme au Canada, ont été conçus il y a plusieurs années et présentent des signes de dégradation prématurée. En effet, un rapport du Ministère des Transports a établi que plus de 50% des ponts du réseau routier québécois ne sont actuellement pas considérés comme étant en bon état et requièrent donc des travaux d'ici cinq ans (MTQ, 2011). Le comportement et la durabilité de ces structures sont influencés par le milieu environnant, plus particulièrement par des phénomènes mécaniques ou chimiques. En effet, la présence d'agents agressifs et de charges mécaniques importantes sont des exemples de facteurs qui entraînent la dégradation du béton.

L'un des phénomènes de dégradation du béton les plus destructeurs est la corrosion des aciers d'armature, ce qui entraîne une diminution de la capacité portante et conséquemment une diminution de la sécurité des usagers. Afin de contrer cette problématique, la réparation et l'entretien des infrastructures sont primordiaux afin de diminuer le risque d'incidents suscitant une inquiétude grandissante dans l'opinion des Québécois. Des méthodes alternatives de réfection et de construction sont donc requises afin de permettre une meilleure durabilité à long terme des infrastructures. Ces solutions doivent permettre d'obtenir des structures plus sécuritaires, tout en diminuant le coût de vie utile des structures. L'une d'elles, soit l'utilisation de matériaux composites comme renforcement interne du béton, s'avère être une solution efficace et rentable.

La venue sur le marché de polymères renforcés de fibres, comme armature interne dans les dalles de tabliers de ponts, constitue une solution alternative à l'acier et est très avantageuse considérant ses propriétés mécaniques et sa durabilité. Les armatures en polymère renforcé de fibre (PRF) s'avèrent très efficaces comparativement aux aciers d'armatures, considérant qu'elles sont non corrosives, très résistantes, légères et présentent une neutralité électromagnétique. Elles sont de plus en plus utilisées dans la construction de ponts routiers, de stationnements, et d'autres structures en béton armé au

Canada et ailleurs dans le monde. Leur utilisation en pratique au Canada est facilitée par les normes et codes de construction élaborés au cours des dernières années (ex., CSA S6, CSA S806 et CSA S807).

Le projet présenté s'inscrit dans le cadre d'un mandat octroyé par la Ville de Québec à AECOM, soit la « Réfection des différentes infrastructures à l'incinérateur ». Ce mandat inclut la réfection de la dalle du quai de déchargement (figure 1), laquelle supporte la circulation des camions-vidanges se déchargeant dans les chutes à déchets. La dalle unidirectionnelle supportée par des poutres de béton à l'intérieur du bâtiment, d'une superficie approximative de 1300 mètres carrés, présentait des zones délaminées et une usure accrue (figure 2) principalement due à la présence de lixiviat et une lourde circulation routière. Malgré plusieurs travaux de réparation à des endroits ponctuels, cette dalle arrive à la fin de sa durée de vie utile et sa réfection complète est alors envisagée. Afin de permettre un bon comportement de la future dalle et un faible entretien, des études conceptuelles ont été effectuées afin de déterminer quelle serait la meilleure option pour la réfection de la dalle considérant son environnement. L'approche proposée et choisie est l'utilisation de polymères renforcés de fibres de verre (PRFV), considérant leurs différents avantages, ainsi que leur coût relativement à leur cycle de vie. De plus, leur résistance élevée et leur non corrosivité, sont des avantages non négligeables comparativement aux armatures conventionnelles en acier.



Figure 1 : Dalle du quai de déchargement



Figure 2 : Signes (fissuration, corrosion, efflorescence) de détérioration

## 2 Conception

La conception a été réalisée conformément à la norme CAN/CSA-S6-06 (2006), la norme CAN/CSA-S806-02 (2002) ainsi que la nouvelle norme CAN/CSA-S806-12 (2012). Les critères les plus restrictifs de ces 3 normes ont été considérés pour la conception de l'ouvrage.

La norme de conception des ponts (CAN/CSA-S6-06) propose deux méthodes pour la conception d'une dalle armée d'armatures. La méthode flexionnelle fut celle choisie, étant donné que l'ouvrage existant ne rencontrait pas toutes les conditions essentielles à l'utilisation de la méthode empirique. La nouvelle dalle du quai a été conçue pour les charges d'utilisation prescrites, soit la circulation des camions-vidanges (CL-625) ainsi que la présence temporaire de déchets humides allant jusqu'à une hauteur de 5 m (25 kPa). La dalle a alors été analysée en utilisant la clause 5.7.1.7.1 et le chapitre 16 de la norme CSA-S6.

Lors de la conception préliminaire, il s'est avéré que la géométrie de l'ouvrage existant, soit une dalle unidirectionnelle de 200 mm ayant des portées de 4,2 m, était inadéquate selon les critères de chargement. De ce fait, la démolition et la reconstruction des poutres existantes ont dû être envisagées. Afin de répondre aux critères de chargement et d'obtenir un meilleur rendement de l'utilisation des barres d'armatures composites, la portée des nouvelles poutres est de 2,8 m avec une dalle ayant une épaisseur de 225 mm. Les charges mortes totales sont de 6,15 kPa, soit la charge de la dalle de béton ainsi que des équipements mécaniques.

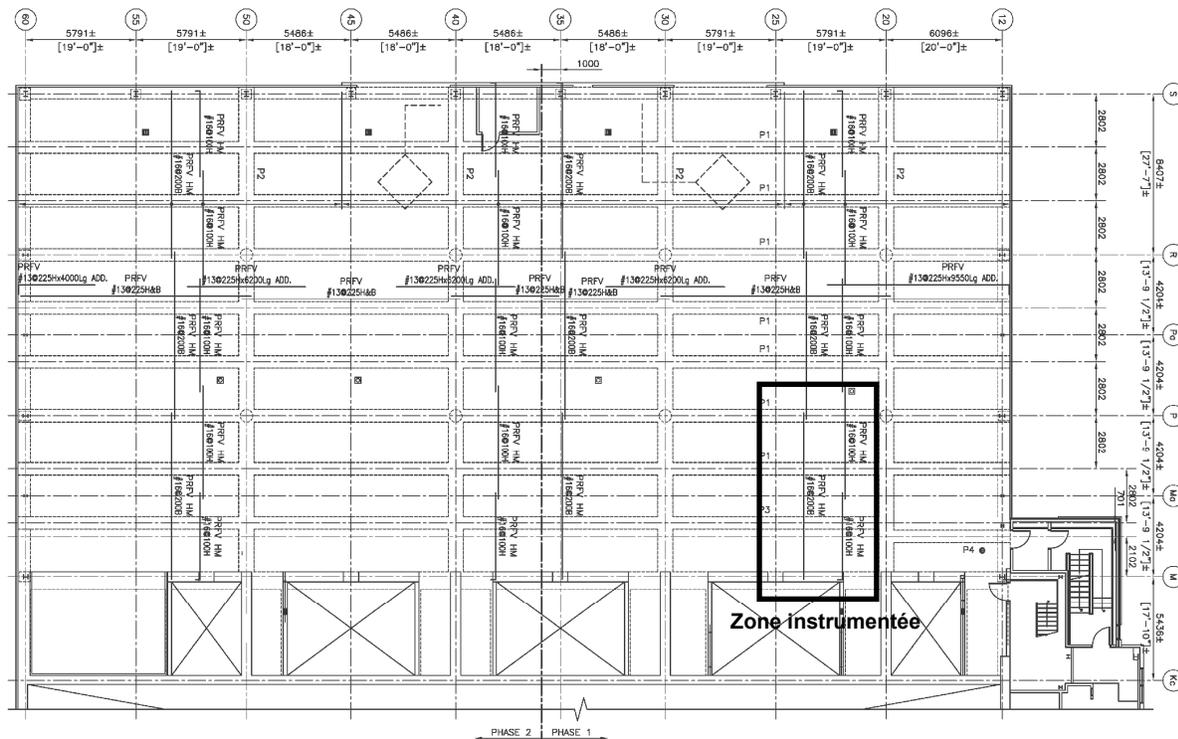


Figure 3 : Vue en plan de la dalle du quai de déchargement

Les efforts de flexion pondérés calculés dans le sens unidirectionnel sont de 54,5 kN.m en flexion positive et de 55,4 kN.m en flexion négative. La dalle a été renforcée avec des barres en PRFV à haut module de 16 mm de diamètre. Ces barres ont une résistance minimum garantie en traction de 1184 MPa et un module de Young moyen de 62,6 GPa. La conception de la dalle a été réalisée selon une rupture désirée en compression. Des recouvrements de 60 mm ont été considérés pour répondre au critère de résistance au feu. La dalle a été conçue selon un béton de densité normal ayant une résistance à la compression de 35 MPa après 28 jours.

Considérant les particularités des polymères renforcés de fibres de verre (faible module élastique, matériau non ductile), les critères en service sont souvent ceux qui prônent sur les critères de résistance, lors de la conception des ouvrages renforcés de matériaux composites. L'étude des critères en service est primordiale afin d'optimiser les méthodes de calculs actuelles. Ces critères sont étroitement liés, considérant que la rigidité des barres agit sur l'ouverture de fissures qui influence la déflexion de l'élément (Ascione et al., 2010).

Afin de répondre aux critères en service, l'analyse de la fissuration, de la déflexion et de la déformation ont été réalisées. Le critère de fissuration a été considéré qu'en zone négative, étant donné que c'est à cet endroit que les agents agressifs peuvent pénétrer dans la dalle. Le critère de fissuration a été vérifié selon le critère « z » de la norme CAN/CSA-S806-02 (2002) étant inférieur à 38 000 N/mm et l'ouverture « w » de la norme CAN/CSA-S6-06 (2006) étant inférieure à 0,5 mm pour un environnement agressif. La flèche sous les charges de service s'est avérée inférieure à L/360. De plus, la déformabilité de la dalle doit être supérieure à 4 et ce, selon la norme CAN-CSA-S6-06 (2006). La déformabilité a été considérée supérieure à 6 dans le cas présent.

L'incinérateur de Québec est continuellement en fonction et les travaux ont dû être réalisés en 2 phases, afin de permettre le déchargement des camions-vidanges dans la fosse à déchets en tout temps. La phase 1 des travaux s'est réalisée des axes 12 à 35, tandis que la phase 2, des axes 35 à 60 (figure 3). Lors de la démolition, les dalles et les poutres, excepté celles de rives, ont été retirées. Il s'est avéré que les sections de dalle n'ayant jamais fait l'objet de réfections antérieures présentaient une dégradation sévère par la présence de délamination, de fissuration et de corrosion (figure 4). La présence d'agents agressifs et de charges importantes sont des causes ayant mené à la dégradation de l'ouvrage.



Figure 4 : Démolition de la dalle du quai de déchargement

La mise en place des barres d'armature composites de la dalle du quai en phase 1 s'est réalisée sur une période d'une semaine, à raison de 2 équipes de travail. La coulée de béton et la finition en phase 1 ont eu lieu le 18 décembre 2012 (figure 5). Une membrane pour le mûrissement du béton a été laissée en place durant 21 jours. Par la suite, le décoffrage de la dalle s'est réalisé durant 1 semaine, suite à la confirmation de la résistance en compression du béton atteinte à 70% par des cylindres témoins.



Figure 5 : Configuration de l'armature, mise en place du béton et mûrissement

### 3 Monitoring

Préalablement aux travaux de construction, une zone représentative de circulation lourde a été sélectionnée, afin d'analyser le comportement et d'évaluer la performance d'une dalle armée de PRFV. Cette zone, montrée à la figure 3, correspond à l'aire de déchargement la plus utilisée par les camions-vidanges et donc, la plus sollicitée. À l'intérieur de cette zone, 4 barres ont été instrumentées, soit 2 en zone de flexion positive et 2 en zone de flexion négative et ce, dans la direction principale uniquement. L'emplacement de ces barres se situe directement sous le positionnement d'une roue de camion. La figure 6 montre l'instrumentation des barres de composite. La mise en place des capteurs s'est fait directement en chantier. Un total de 16 capteurs à fibre optique de type Fabry-Perrot ont été installés, soit 4 capteurs sur chacune des barres. De ces 4 capteurs, 3 capteurs sont utilisés pour recueillir les contraintes en zone de tension et 1 capteur est utilisé pour recueillir la contrainte en zone de compression. La figure 7 montre l'identification et le positionnement des capteurs à fibres optiques.



Figure 6 : Instrumentation des barres en PRFV

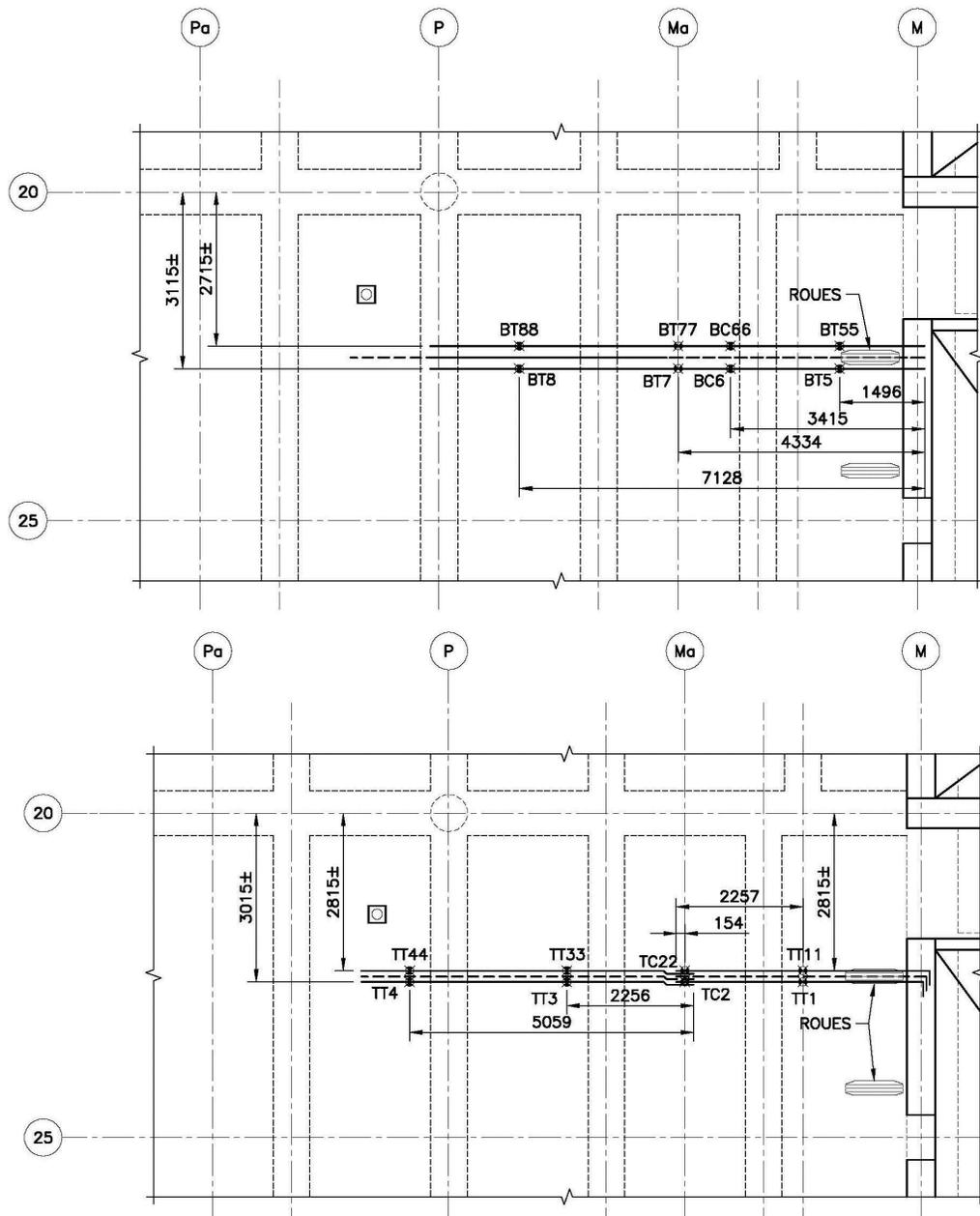
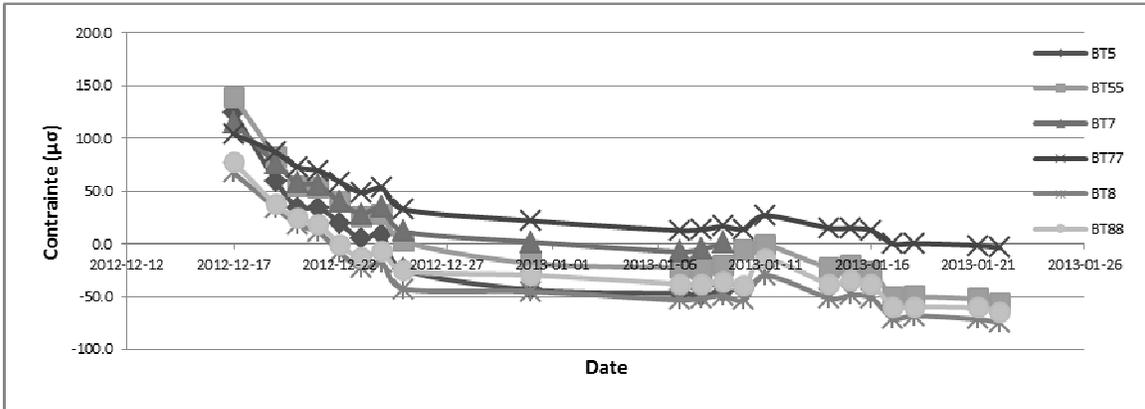


Figure 7 : Identification et positionnement des capteurs à fibres optiques

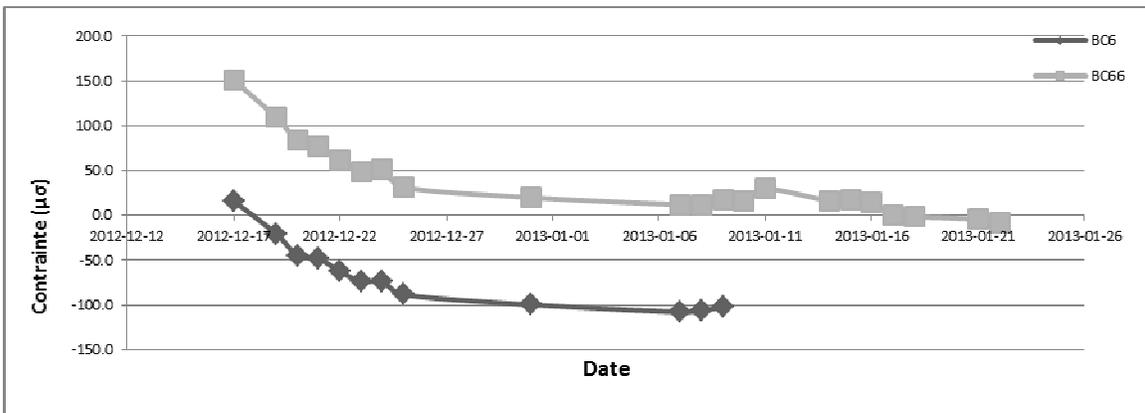
#### 4 Résultats préliminaires

Afin de recueillir et d'enregistrer les données des capteurs à fibre optique, un système d'acquisition de données comportant 7 canaux a été utilisé de façon manuelle. Les premières données ont alors été recueillies 12 heures avant la coulée de béton. Suite à la coulée de béton, les données ont été prises quotidiennement durant 7 journées consécutives. Après cette première semaine de cure, les données ont été recueillies de façon hebdomadaire. Lors du décoffrage de la dalle, les données ont été prises de façon continue afin d'évaluer les variations de contraintes apportées par cette activité. De plus, une inspection visuelle est réalisée de façon hebdomadaire afin de déceler et de faire un suivi de la présence de fissures. Un suivi des données sera réalisé de façon hebdomadaire et de façon continue lors de la

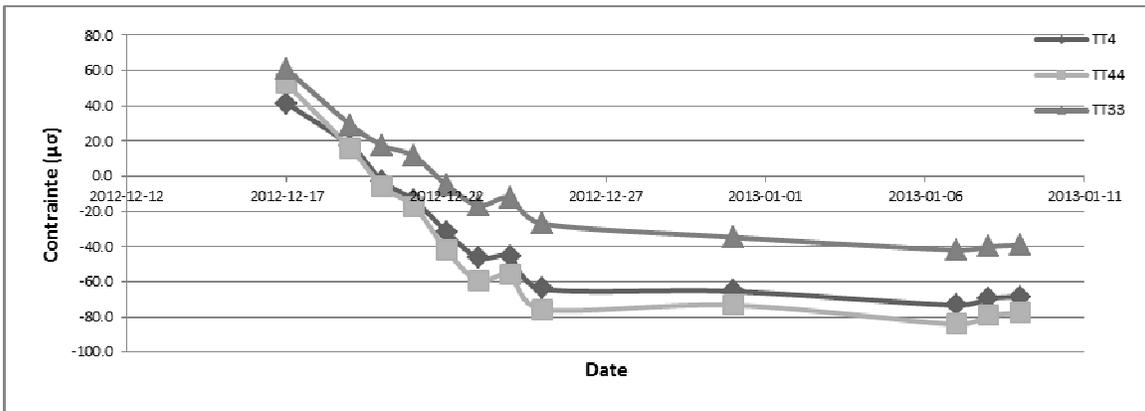
mise en service de la dalle unidirectionnelle. L'ajout d'instruments de mesure pour évaluer les flèches et la fissuration seront alors installés. Il sera alors possible d'évaluer adéquatement le comportement et la performance d'une dalle unidirectionnelle soumise à des charges mécaniques importantes et à un environnement agressif par la présence de lixiviat.



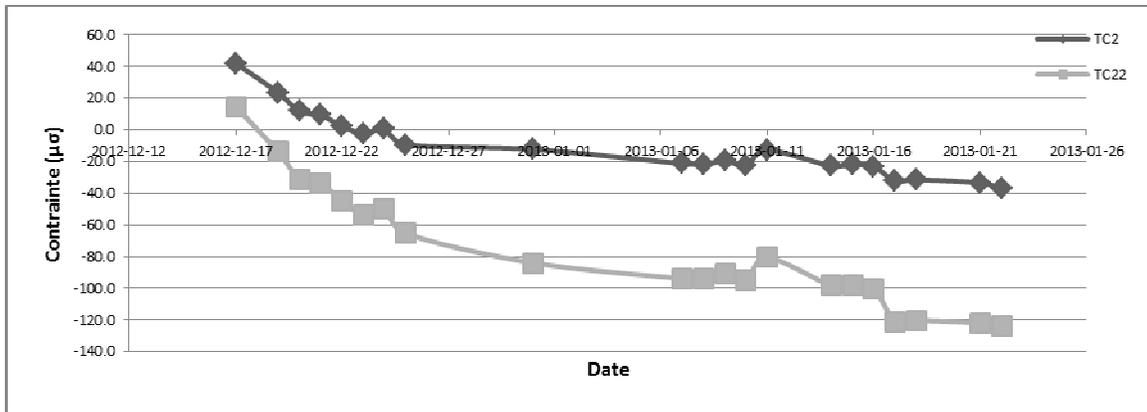
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 8 : Données des contraintes des capteurs: (a) Barres inférieures - Contraintes en tension; (b) Barres inférieures - Contraintes en compression; (c) Barres supérieures - Contraintes en tension; (d) Barres supérieures - Contraintes en compression

Selon la figure 8a, la contrainte initiale en tension des barres inférieures a atteint 150 micro-déformations, soit 0,8% de la déformation ultime d'une barre en PRFV, de haut module de 16 mm de diamètre, utilisées pour le renforcement de la dalle unidirectionnelle. Après le début du décoffrage, soit 3 semaines suite à la coulée de béton, une faible variation a été observée, de l'ordre de 25 micro-contraintes. Selon la figure 8c, la contrainte maximale en tension des barres supérieures a atteint 60 micro-déformations. Cette valeur représente 0,3% de la déformation maximale d'une barre en PRFV. Sur la figure 8b, il est intéressant de constater une variation de la contrainte en compression des barres du niveau inférieur de 150 micro-déformations. Cette variation est attribuable à l'hydratation et au retrait du béton lors du mûrissement. Une faible variation de 20 micro-contraintes a été notée lors du décoffrage de la dalle. L'ajout de poids mort est la conséquence de ce changement, suite à l'enlèvement des étalements. Sur la figure 8d, les résultats sont très comparables. La contrainte maximale en compression enregistrée est de -140 micro-déformations. Selon un thermocouple installé à l'intérieur de la dalle de béton, la température maximale atteinte suite à la coulée a été de 44 degrés Celsius pour atteindre les 20 degrés Celsius après une semaine de cure. Cette donnée confirme alors les variations de contraintes des barres lors des premières journées de mûrissement du béton.

Par ailleurs, un suivi de la fissuration sur le dessus de la dalle est réalisé de façon régulière. Durant le premier mois suite à la coulée de béton, aucune fissure longitudinale ou transversale n'a été décelée. Actuellement, une seule figure diagonale a été notée. Cette dernière a augmentée de 0,15 mm à 0,4 mm. Cette fissuration serait attribuable au retrait du béton. En outre, un suivi de la déflexion de la dalle sera effectué lors de la mise en service de la dalle. Des recherches ont noté que le patron de fissuration d'éléments en béton renforcé de PRF est semblable à celui d'éléments en béton renforcé d'acier sous de faibles charges.

L'instrumentation d'un ouvrage réel permet d'identifier le comportement de la structure à court et à long terme. Parallèlement à l'analyse des données provenant des équipements de mesure, la modélisation numérique par éléments finis de la dalle sera effectuée. Cette modélisation permettra de comparer les résultats expérimentaux et théoriques et ce, afin de déterminer si les normes actuelles de conception d'ouvrages renforcés de fibres en service sont trop restrictives et si une optimisation des critères de calcul peut être effectuée.

## 5 Conclusion

Cet article présente une application très intéressante d'une dalle unidirectionnelle armée de barres en PRFV. Tout comme pour les ponts et les ouvrages de stationnements, la dalle du quai de déchargement

de l'incinérateur de Québec est soumise à des charges similaires, mais aussi à des agents largement plus agressifs. Afin de procéder à la réfection complète de la dalle, la dalle et les poutres, excepté celles de rives, ont été complètement démolies. La dalle a été instrumentée dans la zone la plus critique afin d'obtenir des mesures de contraintes à l'aide de capteurs à fibres optiques. Ces derniers ont été fixés sur les barres de composites du rang inférieur et supérieur, dans les endroits en compression et en tension. Selon les résultats préliminaires, les remarques et conclusion suivantes peuvent être faites :

- L'utilisation des barres non corrosives est un choix prioritaire dans des endroits très agressifs. La dalle du quai de déchargement de l'incinérateur de Québec est très sollicitée chimiquement d'agents de toutes sortes et l'utilisation d'armatures composites s'avère très bénéfique pour la pérennité de l'ouvrage.
- Actuellement, aucun problème majeur ou insoupçonné n'a été perçu depuis la coulée de la dalle. Les contraintes maximales notées par les capteurs à fibres optiques sont très négligeables par rapport à la capacité maximale de déformation des barres en PRFV utilisées.
- Le suivi et la prise de données supplémentaires seront essentielles suite à la mise en service de l'ouvrage afin d'analyser en profondeur le comportement de la structure et de la performance des barres en conditions de service dans un environnement particulier.
- Le renforcement de béton à l'aide de barres en PRFV permet d'avoir une durée de vie supérieure à celle des ouvrages renforcés d'acier. Comparativement aux ouvrages renforcés d'acier, aucune réparation et ou entretien important ne sera prévu pour les 25 prochaines années, voire les 100 prochaines années.

## 6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), le Fond de recherche du Québec - nature et technologies (FRQ-NT) pour le soutien financier ainsi que la firme AECOM (firme de génie-conseil, Québec, Québec), la Ville de Québec (propriétaire du bâtiment), Beauvais & Verret (entrepreneur général) et le département de génie civil, Université de Sherbrooke pour le soutien technique.

## 7 Références

- Almusallam, T. H. et Al-Salloum, Y. 2006. Durability of GFRP rebars in concrete beams under sustained loads at severe environments. *Journal of Composite Materials*, volume 40, numéro 7, p. 623-37.
- Ascione, L., Mancusi, G. et Spadea, S. 2010. Flexural behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars. Dans, volume 46. Blackwell Publishing Ltd, 9600 Garsington Road, Oxford, OX4 2XG, United Kingdom, p. 460-469.
- Benmokrane, B. (2009). *Manuel de calcul des structures en béton armé de barres en PRF*, Manuel de calcul no.3, 2e édition. ISIS Canada Corporation, Canada, 137 p.
- Canadian Standard Association (CSA). 2004. *Calcul des ouvrages en béton*, édition 2004 (CAN/CSA-A23.3-04). Rexdale, ON, Canada, 632 p.
- Canadian Standard Association (CSA). 2006. *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*, édition 2006 (CAN/CSA-S6-06). Rexdale, ON, Canada, 820 p.
- Canadian Standard Association (CSA). 2002. *Règles de calcul et de construction des composants des polymères renforcés de fibres*, édition 2002 (CAN/CSA-S806-02). Rexdale, ON, Canada, 212 p.
- Canadian Standard Association (CSA). 2012. *Specification for fibre-reinforced polymers*, édition 2010. (CAN/CSA-S806-12). Rexdale, ON, Canada, 187 p.
- Canadian Standard Association (CSA). 2010. *Design and construction of building structures with fibres-reinforced polymers* édition 2012. (CAN/CSA-S807-10). Rexdale, ON, Canada, 44 p.
- Ministère des Transports du Québec. 2011. Rapport annuel de gestion 2010-2011. *Ministère des Transports du Québec*, <http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/bpm/RAG%202010-2011->

%C9lectronique%20(PDF%20FINAL%20cliquable%20VFF%20du%202.pdf (page consultée le 3 mars 2012).

Mota, C., Alminar, S. et Svecova, D. 2006. Critical review of deflection formulas for FRP-RC members. *Journal of Composites for Construction*, volume 10, numéro 3, p. 183-194.