Bétonnage d'une dalle de pont par temps froid (en janvier) – Présentation du cas de l'échangeur Charest-Robert-Bourrassa

F. Paradis[1], R. Abrahamme[2], J. Blouin[2] et P. Dandois[1]

(1) CIMA+, 1145 boul. Lebourgneuf, bureau 300, Québec, Canada, G2K 2K8

(2) Génivar
5355, boul. des Gradins, Québec, Canada, G2J 1C8

RÉSUMÉ

Le document présente la construction du pont P-17010A situé dans l'échangeur Charest-Robert-Bourrassa. Dans un premier temps, le pont et les particularités de sa conception sont présentés. Une attention particulière est portée sur l'unicité du pont (hybride entre un portique et un tunnel). Dans un deuxième temps, la présentation est orientée sur la construction du pont qui a été réalisée en période hivernale. Les béquilles ou murs du tunnel ont été construits à l'automne 2009 et la dalle du pont a été bétonnée au mois de janvier 2010. Le bétonnage de la dalle a nécessité attention particulière afin d'obtenir un ouvrage durable. Les précautions, le type d'abri et les méthodes de chauffage utilisées pour la réalisation du pont sont présentés. Le type de béton utilisé (béton ternaire) est ensuite discuté ainsi que les méthodes de cure. Les raisons pour lesquelles l'ouvrage a été construit en période hivernale sont également discutées.

1. Introduction

Au Québec, la période de l'année où les conditions climatiques sont propices à la construction d'ouvrages d'art est relativement courte. En particulier, pour la mise en place et la cure du béton, la température minimale ambiante doit être supérieure à 5 degrés Celsius pour que ce dernier puisse développer ses propriétés mécaniques et de durabilité. Afin de permettre les travaux de bétonnage lorsque les températures ambiantes sont inférieures à cette limite, le Ministère des transports du Québec prévoit certaines méthodes pour abriter et chauffer le béton lors de sa mise en place et de sa cure. Toutefois, avec les protections actuellement proposées, lorsque la température minimale ambiante est inferieure à -10 °C, le ministère interdit les travaux de bétonner.

Dans le cadre du projet du réaménagement de l'échangeur Charest-Robert-Bourrassa dans la région de Québec, la construction de la dalle du pont P-17010A devait être complétée en période hivernale, soit au mois de janvier. Les exigences décrites au cahier des charges et devis généraux ne sont donc pas applicables. Afin de réaliser cet ouvrage, des précautions supplémentaires ont donc été prises afin d'obtenir un ouvrage de qualité. Le présent article décrit, dans un premier temps, les caractéristiques du pont. Dans un deuxième temps, les précautions prises pour réaliser la construction du pont en période hivernale sont décrites et le type de béton choisi est discuté.

2. Présentation du pont

Le pont P-17010A est l'une des trois structures de la bretelle X du projet de la phase 1 de l'échangeur Charest-Bourassa. Ce pont d'étagement supporte la bretelle X afin accédant à l'autoroute Charest, direction ouest, et chevauche le collecteur ouest menant au Parc technologique ou l'insertion sur l'autoroute Charest. Une vue de chaque extrémité de l'ouvrage est présentée sur les photos 1 et 2.

Photo 1 : Élévation ouest

Photo 2 : Élévation est

2.1. Choix de conception et description de l'option retenue

Tel qu'illustré à la figure 1, la contrainte principale dans le choix du type de pont et de la conception de celui-ci est le fort biais formé entre les deux chaussées. Celui-ci est de beaucoup supérieur aux limites dictées par les critères de conception du Ministère des transports du Québec. En effet, le biais de l'ouvrage est de 75 degrés alors que les valeurs maximales dictées sont comprises entre 20 à 30 degrés selon le type de structures. De plus, dû à des contraintes de route, la profondeur de la structure doit être le plus mince possible.

Ces contraintes géométriques du site limitent les options possibles pour le type de structure. La faisabilité d'un pont avec culées standards, un biais de 20 degrés et possédant une portée simple de 90 mètres fut étudiée. Cependant, la profondeur des poutres était trop importante et aurait imposée la nécessité de rehausser la bretelle X, ce qui était impossible. La construction d'une pile intermédiaire au centre du collecteur, ce qui aurait diminué la longueur de la travée, est impossible

Une autre option étudiée était la construction d'un pont avec un biais de 75 degrés. Ce pont aurait eu une portée simple de 71 mètres et impliquait une analyse du tablier par éléments finis. Encore là, la profondeur du tablier ne respectait pas le gabarit routier imposé par les élévations du profil des collecteurs.

L'option retenue fut donc un système hybride entre un portique en béton armé et un tunnel avec un biais de 20 degrés illustré aux figures 1 et 2.

2.2. Particularités du pont d'étagement

La structure est de type portique en béton armé ayant les dimensions suivantes :

- Distance entre axes : 22 530 mm
- Longueur moyenne de la structure : 70 000 mm
- Portée libre entre les murs : 20 400 mm
- Épaisseur de la dalle : 1 300 aux appuis et 1 000 mm en travée
- Construction sur pieux

Le rapport entre l'épaisseur de la dalle et sa longueur est de 1/20^{e}.

La structure est monolithique avec une certaine particularité pour la dalle. Celle-ci possède des conditions d'appui différentes selon l'axe longitudinal de l'ouvrage, ceci afin de diminuer au maximum la sensation de tunnel pour les utilisateurs. Tel qu'illustré à la figure 1, le pont possède deux axes de symétrie, au centre de sa longueur et dans l'axe longitudinal. Dans la partie centrale, sur une longueur de 11 mètres, la dalle est encastrée aux murs aux deux extrémités. Puis, de chaque coté de cette partie centrale, sur une distance de 21 mètres, la datte est encastrée du bord du mur et simplement appuyée sur une série de cinq colonnes de l'autre bord. Finalement, une partie de dalle de forme triangulaire en porte-à-faux sur un mur complète l'ouvrage aux deux extrémités. Ainsi, la structure peut être divisée en cinq « sous-structures » dont trois types de « sous-structure ». La longueur de la dalle étant importante (53 mètres), une précontrainte transversale par post-tension est réalisée afin de limiter la fissuration de la dalle.

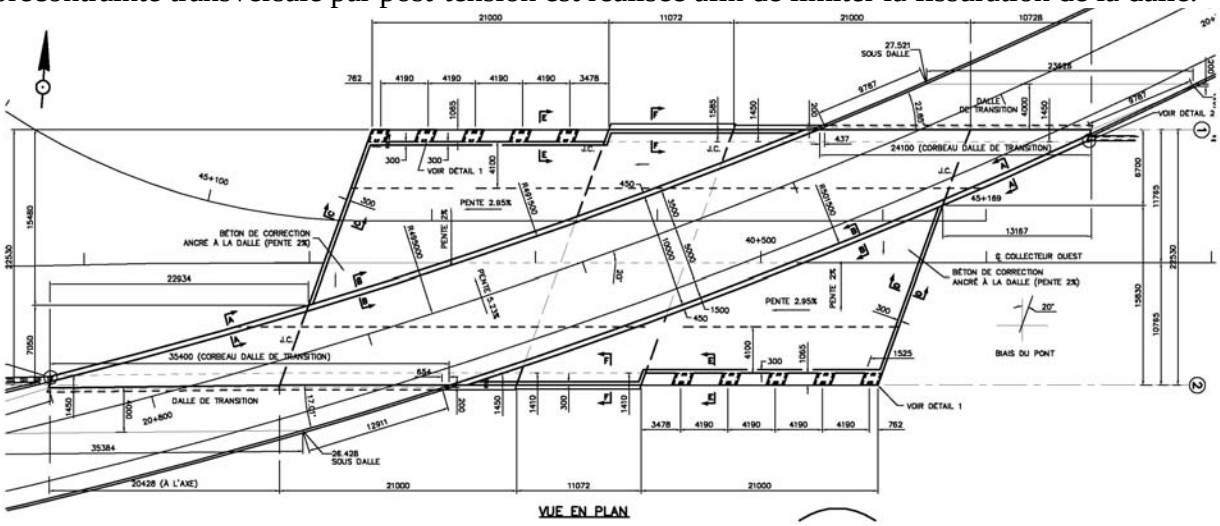

Figure 1 : Vue en plan de la structure

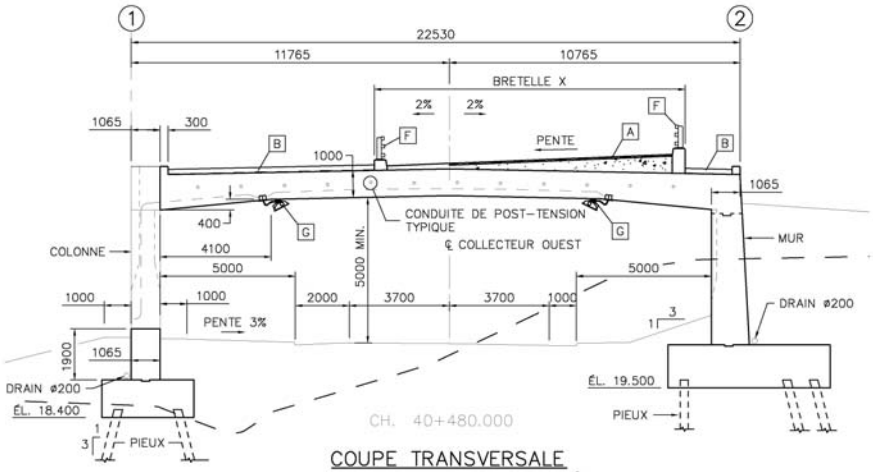

Figure 2 : Coupe transversale au chaînage 40+480 du collecteur

La géométrie particulière de l'ouvrage et le biais formé par l'axe de la circulation sur le pont produisent des moments bidirectionnels dans la dalle dus aux charges permanentes et aux charges vives.

Étant donné la forme complexe de la structure, une modélisation 3D de celle-ci par éléments finis fut réalisée. De plus, les combinaisons de la charge routière CL-625 furent positionnées en trois dimensions sur le modèle pour le calcul des efforts et des flèches.

Les cinq « sous-structures », étant monolithique, travaillent ensemble malgré leur comportement structural différent à cause des conditions d'appui propres à chaque « sous-structure ». Les analyses structurales démontrent que les fibres du béton tendues dans les béquilles et la dalle s'inversent suivant le plan de coupe transversal dans l'ouvrage. Ainsi, pour le calcul des armatures et des pieux, des zones de transition d'inversion d'efforts de cinq mètres ont été considérées dans lesquelles les armatures et les pieux sont inversés selon le sens signe (+/-) des efforts. La figure 3 montre l'orientation des pieux sur une portion de la semelle de l'axe 2. Les coupes AA et BB de la figure 4 montrent respectivement l'orientation des pieux pour la section où la dalle est encastrée à une extrémité et rotulée à l'autre et où la dalle est encastrée aux deux extrémités.

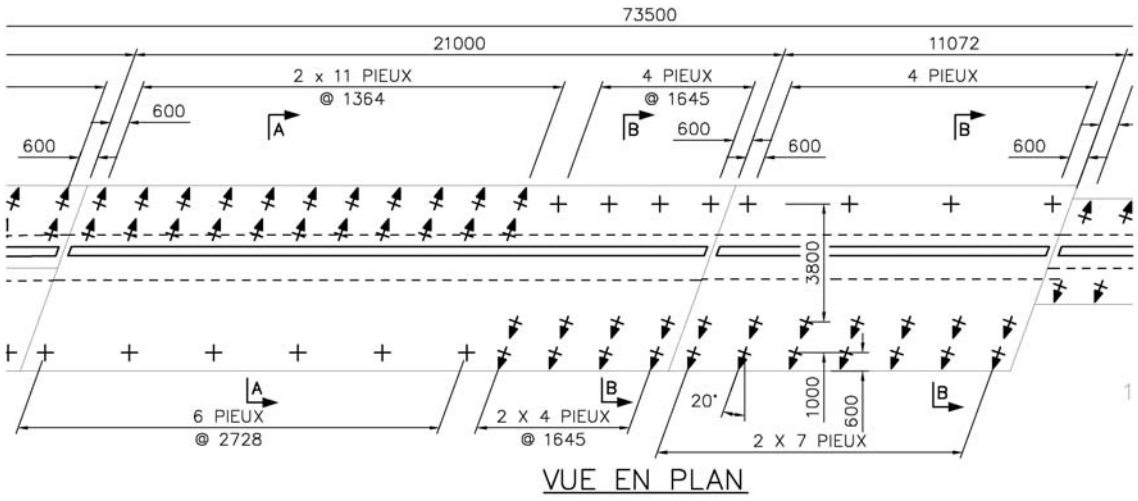

Figure 3 : Vue en plan des fondations avec l'implantation des pieux

Enfin, sur le tablier, de chaque côté de la voie carrossable, un couvert végétal est prévu et une attention architecturale fut apportée aux colonnes et aux murs.

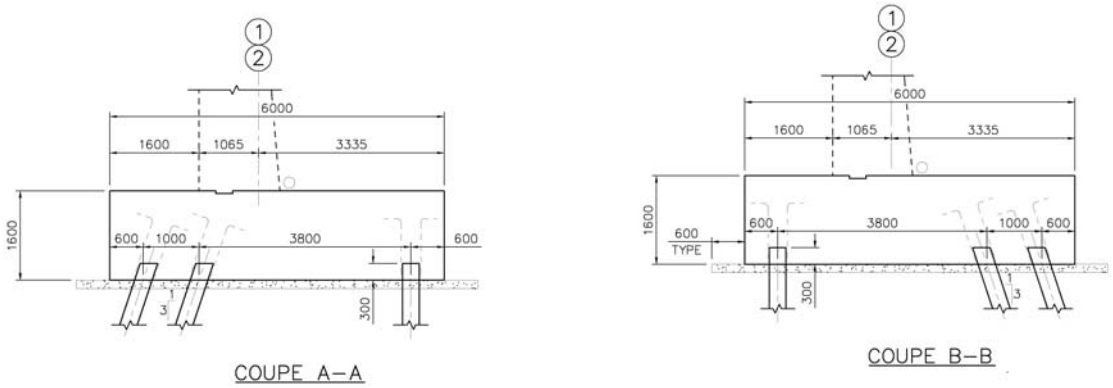

Figure 4 : Orientation des pieux

3. Pourquoi bétonner en période hivernale

Le projet du réaménagement de l'échangeur Charest-Robert-Bourrassa est un projet d'envergure dont les coûts de construction sont évalués à près de 250 millions de dollars. La réalisation de ce projet est prévue s'échelonner sur quatre années et implique des travaux sur un des échangeurs les plus achalandés de la ville de Québec. L'échangeur doit être conservé en opération et les impacts sur les usagers du réseau routier doivent être limités le plus possible. Afin de minimiser ces impacts, le Ministère des transports du Québec a subdivisé le projet en plusieurs phases et a préparé un échéancier serré des travaux. Pour que la réalisation du projet soit un succès, chaque phase du projet doit être réalisée dans un ordre précis et selon les délais prescrits. En fait, chaque phase est une partie du puzzle et si une partie du puzzle n'est pas mise en place au bon moment, le reste du projet est retardé. Dans l'ensemble du projet, les travaux prévus en hiver ont été

minimisés. Toutefois, pour réduire la durée du projet, le parachèvement de certains travaux ont été prévus tard à l'automne ou au début de l'hiver.

Avec l'obligation de compléter chaque phase du projet au bon moment, la construction du pont P-17010A, réalisée dans la première phase des travaux, devait être achevé le 1er avril 2010 afin de permettre le début de la deuxième phase. En effet, selon le phasage des travaux, le trafic doit passer sous ce pont afin de permettre le début des travaux de la seconde phase. Celle-ci peut donc débuter tôt au printemps et profiter de toute la période climatique favorable aux travaux de génie civil. Ainsi, afin de ne pas retarder l'ensemble du projet d'un an ou que des travaux encore plus importants de bétonnage de dalle soit réalisés en hiver, les travaux de construction du pont P-17010A doivent être réalisés en période hivernale.

4. Bétonnage en période hivernale

4.1. Description de l'abri utilisé et de la méthode de protection

Le bétonnage d'une dalle en période hivernale nécessite des mesures importantes de protection contre les températures froides. Pour assurer une température ambiante adéquate de la dalle de béton, soit entre 10 °C et 20 °C, un abri enveloppant entièrement la dalle a dû être construit.

L'abri mis en place était formé de deux parties, soit le dessous et le dessus de la dalle. Pour protéger le dessous de la dalle, les extrémités du pont ont été fermées hermétiquement à l'aide de toiles à chaque extrémité, les murs du portique obstruant les deux autres côtés. Le dessus de la dalle a été couvert à l'aide d'une charpente métallique prenant appui sur des échafauds installés à l'extérieur des murs du portique comme montré à la photo 3. Sur la charpente métallique, un contreplaqué a été fixé et recouvert d'une toile isolante (voir photo 4). La charpente métallique fut conçue pour supporter les travailleurs et une accumulation de neige. De plus, la toile limite les entrées d'air froid dans l'abri. La photo 5 montre l'intérieur de l'abri avec la charpente métallique utilisée pour former le toit. Un dégagement vertical entre la dalle et la charpente métallique d'environ 1.5 à 2.5 mètres a été prévu pour permettre la libre circulation à l'intérieur de l'abri des travailleurs et équipement de mise en place du béton. Toutefois, ce dégagement aurait pu être réduit et ainsi diminuer le volume d'air à chauffer dans l'abri.

Photo 3 : Vue d'ensemble de l'abri

Photo 4 : vue du dessus de l'abri

Photo 5 : Vue de l'intérieur de l'abri

Pour chauffer l'abri, trois types d'appareils de chauffage ont été utilisés. Le premier type, et le plus standard, est une chaufferette à l'huile communément appelée « cochon ». Des unités de chauffage radiant ont également été utilisées. Un nouveau système de chauffage sur le marché pour le domaine de la construction a également été utilisé et fonctionne au glycol. Ce dernier système est, aux dires de l'entrepreneur, plus économique en consommation d'énergie. Basé sur l'expérience de chantier, ce système de chauffage fonctionne bien et conserve une température constante dans un abri. Toutefois, il ne semble pas adapté pour élever la température dans un abri. Une combinaison de divers systèmes de chauffage est donc conseillée.

4.2. Procédure de bétonnage et précaution

Le bétonnage de la dalle a été réalisé dans la première semaine de janvier 2010. Les températures extérieures lors du bétonnage de la dalle variaient entre -5 à -15°C. Pour effectuer le bétonnage de la dalle, des ouvertures ont été pratiquées dans le toit de l'abri pour donner accès au tuyau de la pompe à béton. En période hivernale où la température est froide, il est important que les ouvertures soient réduites au minimum afin de limiter les pertes de chaleur. De plus, les ouvertures locales faites dans le toit de l'abri étaient temporaires et après chaque déplacement du tuyau de la pompe, une nouvelle ouverture était pratiquée et celle inutilisée était refermée

immédiatement. Les photos 6 et 7 illustrent les ouvertures réalisées lors de la mise en place du béton. Il est intéressant de noter que la perte de chaleur dans l'abri provoqué par ces ouvertures était relativement faible lorsqu'il n'y avait pas de vent à l'extérieur. Toutefois, par journée de grand vent, les pertes de chaleur étaient très importantes. D'ailleurs, le bétonnage de la dalle a été reporté dû à la présence de grands vents. L'installation utilisée aurait permis de réaliser le bétonnage de la dalle en toute sécurité pour le béton jusqu'à une température de -25 °C sans vent.

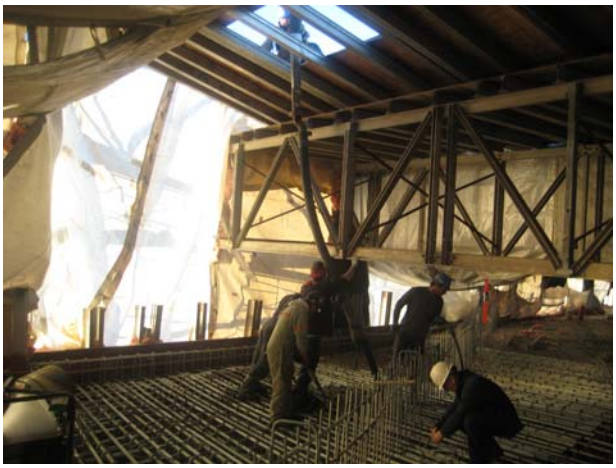

Photo 6 : Bétonnage de la dalle

Photo 7 : Ouverture dans l'abri pour bétonnage

La réalisation d'une bruine immédiatement après la mise en place du béton est difficilement réalisable dans un abri de ce genre en période hivernale. Donc, pour limiter l'évaporation de l'eau en surface du béton, un produit réduisant l'évaporation a été mis en place sur le béton après la finition de ce dernier. Ce produit a la propriété de limiter l'évaporation de l'eau dans les premières heures de cure du béton.

4.3. Type de cure du béton

Les conditions hivernales au Québec ne permettent pas de réaliser facilement une cure à l'eau. Toutefois, la cure à l'eau demeure la meilleure méthode de cure, car elle empêche tout dégagement d'eau durant cette phase critique. Ainsi, la fissuration du béton est limitée et la durabilité de celui-ci est augmentée. Pour ces raisons, une cure à l'eau a donc été réalisée sur la dalle du pont. De l'eau a été apportée au le chantier à l'aide d'un camion-citerne. L'eau était entreposée dans des réservoirs à l'intérieur de l'abri afin de tempérer celle-ci à environ 10 °C. Les membranes absorbantes déposées sur la dalle étaient arrosées deux fois par jour ou au besoin afin de conserver le dessus de la dalle humide. Ces membranes ont été recouvertes de toiles isolantes. Les toiles isolantes avaient pour objectifs de limiter l'évaporation de l'eau ainsi que de procurer une protection supplémentaire contre le froid en cas de bris de l'abri (arrêt du chauffage, bris d'une toile, etc.).

4.4. Suivi des températures

Afin d'assurer la qualité de l'ouvrage, un suivi des températures dans l'abri et du béton a été fait tout au long de la construction et de la cure de la dalle. Deux jours avant le début du bétonnage, le chauffage de l'abri a débuté afin d'amener les coffrages et l'armature à une température acceptable Variant entre 20 et 30°C ainsi que pour valider si la capacité des unités de chauffage étaient adéquate pour chauffer l'abri. Quinze thermomètres ont été installés à divers endroits dans l'abri pour assurer le suivi de la température ambiante. Ces thermomètres ont permis d'ajuster le nombre et la position des unités de chauffage ainsi que d'améliorer localement l'isolation de l'abri.

De plus, des thermocouples installés dans la dalle ont également permis de suivre la température du béton. Des thermocouples ont été employés afin d'obtenir de l'information sur le développement de la capacité du béton et si un gradient de température se formait dans la dalle lors du bétonnage. Des thermocouples ont donc été placés dans le bas, au centre et au haut de la dalle. De plus, des thermocouples ont été installés à divers endroits (au centre et, surtout, près des rives) de la dalle afin d'évaluer si le béton avait suffisamment de chaleur pour développer ses propriétés. La température du béton a été suivie afin de s'assurer que le béton ne gèlerait pas, mais également pour s'assurer que le béton ne chaufferait pas trop. Le béton devait rester en haut de 10 °C et ne pas dépasser 60 °C pour éviter les problèmes d'étreingîtes secondaire. Avec toutes les précautions prises lors de la construction, aucun problème n'est survenu lors du bétonnage et pendant la cure du béton.

5. Choix du type de béton

Pour la construction des ponts au Québec, le Ministère des transports favorise l'utilisation d'un béton ayant une résistance de 35 MPa possédant certaines propriétés énumérées dans ses normes. Ce mélange de béton peut être produit à l'aide de ciment binaire (Gub-SF) ou de ciment ternaire avec laitier de hauts fourneaux ou cendres volantes. La direction territoriale de la Capitale-Nationale du Ministère des transports favorise l'utilisation du béton ternaire, car les ajouts cimentaires mis dans le béton ont un effet positif sur plusieurs de ses propriétés. La forme géométrique et la finesse des particules influent, en autre, la maniabilité et le ressuage du béton frais (Neville 2000). De plus, les ajouts cimentaires modifient la cinétique d'hydratation du béton compte tenu de leurs propriétés. À long terme, la composition des hydrates et la porosité qui résultent de l'hydratation des ajouts cimentaires peuvent varier par rapport à celles résultant de l'hydratation du ciment (Taylor 1997). Ces différences microstructurales du béton influencent divers aspects de la durabilité, notamment les propriétés de transport et la résistance aux agressions chimiques. Ces aspects sont discutés plus précisément dans le mémoire de Tremblay (2009) et de plusieurs autres ouvrages traitant de ce sujet (De Larrard 1999; Neville 2000; Mindess et coll. 2003; Malhotra et Mehta 2005).

Un des avantages des ciments ternaires consiste en la diminution de la perméabilité du béton. De plus, tel que discuté dans le mémoire de Tremblay (2009), les cendres volantes permettent de réduire la chaleur d'hydratation et d'améliorer la maniabilité. La réaction d'hydratation ne débute qu'un certain temps après le malaxage puisque la partie amorphe des cendres volantes (le verre)

ne réagit que lorsque le pH du liquide interstitiel atteint 13,2 (Neville 2000). L'augmentation de l'alcalinité de la solution nécessite qu'une partie de l'hydratation du ciment soit amorcée. Durant les premières semaines suite bétonnage, comme l'hydratation des cendres est plus lente, la porosité et la perméabilité du béton sont plus importantes et son développement en résistance est plus faible que pour un béton ordinaire comparable. Toutefois, après quelques semaines de réaction, la pâte contenant des cendres volantes possède une structure poreuse plus fine. Ces améliorations sont dues à l'activité pouzzolanique et à l'amélioration de la compacité due à la finesse des cendres volantes qui ont la capacité de s'intercaler entre les grains de ciment. Enfin, comme la cinétique de réaction du ciment ternaire est plus lente et que la chaleur d'hydratation est plus faible, il en résulte souvent un béton avec une fissuration plus faible.

Dans le cas des bétons avec du laitier de grade 100, le gain de résistance du béton est plus lent au cours des cinq premiers jours, semblable entre 7 et 28 jours et supérieur ensuite. La chaleur d'hydratation est donc plus faible que pour un béton ordinaire. Pour un béton au laitier bien mûri, la perméabilité est réduite. Toutefois, la profondeur de carbonatation est plus grande aux jeunes âges en raison de la faible quantité de portlandite dans la pâte de ciment hydratée qui empêche la fixation du gaz carbonique près de la surface du béton, ce qui aurait une influence sur la résistance du béton en surface La faible perméabilité évite toutefois une augmentation continue de la profondeur de carbonatation (Neville 2000).

Enfin, comme la cinétique de réaction des ciments ternaires engendre une porosité plus fine et une fissuration plus faible, limitant la migration des sels et de l'eau, le béton produit avec des ciments ternaires est donc plus durable.

Par contre, les bétons ternaires sont plus sensibles au froid que les bétons ordinaires. En fait, la présence d'ajouts cimentaires a une influence sur la cinétique de réaction du béton tel que discuté précédemment. Selon certains chercheurs, la résistance à l'écaillage des bétons ternaires est moindre car la surface des bétons ternaires est plus affectée par la carbonatation que les bétons ordinaires et car le développement des résistances est plus faible. La problématique d'écaillage des bétons ternaires a été observée à plusieurs reprises, mais les phénomènes exacts qui contrôlent cette mauvaise résistance restent encore peu connus. Des recherches supplémentaires sur ce sujet sont donc nécessaires pour bien comprendre le phénomène.

Des précautions supplémentaires doivent donc être prises pour éviter des problèmes d'écaillage lorsque le béton ternaire est mis en place en période de temps froids. Le CCDG interdit d'ailleurs l'utilisation de béton ternaire durant ces périodes. Toutefois, la direction territoriale de la Capitale-Nationale croit au bien fait du béton ternaire et persiste à l'utiliser même en période de temps froids. Afin d'éviter les problèmes d'écaillage, la direction territoriale de la Capitale-Nationale prend certaines précautions supplémentaires. La principale précaution consiste à chauffer le béton sur une période de temps plus importante, soit un chauffage additionnel de 10 jours supplémentaires. Cette période de chauffage supplémentaire a donné de bons résultats sur les projets passés sur le territoire de la Capitale-Nationale. Des recherches supplémentaires pourraient toutefois être réalisées afin de déterminer le nombre de jours de chauffage nécessaire pour obtenir ces bons résultats. De plus, il serait intéressant de corréler la résistance à l'écaillage du béton avec le degré de mûrissement mesuré. Le paramètre des degrés-jours, par exemple, ou une autre méthode, pourrait être employée.

6. Conclusion

En conclusion, ce projet a été un succès et démontre qu'il est possible de réaliser des travaux de construction d'ouvrages d'art en condition hivernale tout en assurant une bonne qualité et durabilité à celui-ci. Il faut toutefois prendre plusieurs précautions particulières pour réaliser un ouvrage de qualité. Un suivi serré tout au long des travaux doit être fait par des personnes expertes dans le domaine du béton. Par ailleurs, un bétonnage en période hivernale n'est pas conseillé puisqu'il y a des risques engendré par le froid ainsi qu'aux frais supplémentaires engendrés par toutes les précautions nécessaires.

Enfin, la réalisation d'un tel ouvrage en période hivernale demande une excellente collaboration entre les divers intervenants du projet. Des félicitations doivent être données à toute l'équipe qui a participé à la construction de ce pont, soit à l'entrepreneur général (EBC), qui a coordonné les travaux, à Coffrage LD, qui a construit les coffrages et la mise en place du béton, à IEQ, qui a érigé l'abri, à LEQ, le laboratoire de contrôle des matériaux, au Ministère des Transports ainsi qu'aux surveillants des travaux (le consortium Génivar-CIMA+).

7. Références

De Larrard, F. (1999) *Concrete Mixture Proportioning*, E&F SPON, London, 421 p.

Malhotra, V.M., Mehta, P.K. (2005) *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete : Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories*, Second Revised Edition, Ottawa, 124 p.

Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D. (2003) *Concrete*, Second Edition, Prentice-Hall, 644 p.

Neville, A.M. (200) *Propriétés des Bétons*, Eyrolles, 806 p.

Taylor, H.F.W. (1997) *Cement Chemistry*, Second Edition, Thomas Telford, London, 459 p.

Tremblay, M.H. (2009) *Écaillage des bétons contenant des ajouts cimentaires*, Mémoire de maitrise, Université Laval, Ste-Foy, Québec, Canada