

CONSTRUCTION D'UN PONT EN ARC AU-DESSUS DE L'AUTOROUTE 73 À STONEHAM – PARTIE 2 : CONSTRUCTION DU TABLIER

F. Paradis, ing. Ph. D., J-P Perron, ing. M. Sc, P. Dandois, ing. M. Sc. et Y. Maltais, ing. Ph. D.

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

RÉSUMÉ

Cet article présente la conception et la construction d'un pont d'étagement en arc à tablier inférieur réalisé dans le cadre du projet de réaménagement de la route 175 à Stoneham. Le pont est constitué de deux arcs en béton supportant, à l'aide de câbles, un tablier inférieur composé de poutres d'acier et d'une dalle de béton. La longueur de la travée est de 68,5 mètres, sa largeur de 16 mètres et son biais de 45 degrés. Les arcs s'élèvent sur une hauteur de 21 mètres, mesurée de leur base à leur cime. Pour améliorer l'esthétisme de la structure, différentes propositions architecturales ont été intégrées à la conception considérant qu'il s'agit d'un ouvrage exposé à une grande visibilité à l'entrée de la région de Québec.

Cet article fait suite à la première partie présentée en 2011 à ce même colloque. La deuxième partie porte sur la conception et la construction du tablier. Les particularités liées à la conception de ce tablier suspendu ainsi que la présence d'un fort biais sont d'abord présentées. La conception des appareils d'appui est ensuite discutée. Finalement, les méthodes de construction et difficultés rencontrées inhérentes à la construction du tablier sont présentées.

1. INTRODUCTION

Le projet de construction de l'axe routier 73/175 comprend la réalisation d'une route à quatre (4) voies et chaussées divisées sur 174 km entre Québec et Saguenay. Ce projet réalisé par le ministère des Transports du Québec est l'un des plus importants de son histoire et représente un investissement d'environ un (1) milliard de dollars. Dans le cadre de ce projet, qui doit être complété en 2012, plusieurs ouvrages d'art ont été construits, dont le pont P-11668 qui constitue le sujet de cet article.

Situé dans la municipalité de Stoneham-et-Tewkesbury à 30 kilomètres au nord de la Ville de Québec, le pont P-11668 permet au boulevard Talbot d'emjamber la future autoroute 73 au kilomètre 69+440. Le type de structure retenu pour ce projet est un pont en arc de béton à tablier inférieur, soit une structure de type 72 selon la nomenclature du Ministère. Mentionnons que ce type de pont est peu commun au Québec puisqu'il n'est que le deuxième de son genre à être construit sur le réseau routier québécois, l'autre ayant été érigé à la fin des années 1960 sur l'autoroute 15 dans les Laurentides. Le choix de construire un pont en arc découle d'une étude de concepts réalisée par CIMA+ entre 2005 et 2007. Cette étude avait pour objectif de trouver le type de structure le mieux adapté aux contraintes imposées par les particularités du site choisi pour y construire l'ouvrage.

La partie 1 de l'article présenté lors de ce même colloque en 2011 présentait les principales raisons qui ont amené CIMA+ à recommander au ministère des Transports la construction d'un pont en arc en béton à tablier inférieur. De plus, cet article discutait de la conception et la construction des unités de fondation et des arcs.

Le présent document, qui constitue la seconde partie de l'article, traite principalement du tablier. Tout d'abord, la géométrie et les principales caractéristiques des différents éléments structuraux constituant ce pont sont présentées. Ensuite, la conception du tablier est discutée à travers les choix qui ont été privilégiés par l'équipe de concepteurs tout au long du projet. Le comportement du tablier est expliqué et les particularités de la conception sont présentées. La construction de l'ouvrage est par la suite présentée. Pour terminer, les détails architecturaux visant à mettre en valeur cet ouvrage d'art peu commun sont décrits.

2. PRÉSENTATION DU PONT

Le pont est situé sur le boulevard Talbot et enjambe la future autoroute 73 avec un biais de 49 degrés. Les culées sont toutefois orientées avec un biais de 45 degrés par rapport à l'axe du pont afin de faciliter sa construction et minimiser les risques d'erreur de cote au chantier. Trois voies de circulation sont en opération sur le boulevard Talbot et doivent être conservées opérationnelles durant la construction de l'autoroute 73. Cette exigence impose une largeur carrossable de 13,4 mètres pour le nouveau pont. Une fois la construction de l'autoroute 73 complétée, le pont comportera deux voies de circulation.

Les dimensions du pont se caractérisent par une portée de 68,5 mètres et une largeur hors-tout de l'ouvrage, incluant les arcs et les porte-à-faux, de 18,5 mètres.

Les arcs ont une forme parabolique de type funiculaire. Leur hauteur par rapport au tablier est d'environ 14 mètres et de 20 mètres par rapport au niveau de l'autoroute 73. La section d'un arc est variable passant de 800 x 1 200 mm au sommet à 1 500 x 2 400 mm à sa base. Les arcs sont encastrés à leur base dans des massifs intégrés aux culées. Les unités de fondation, incluant les massifs et les culées, prennent appuies sur le roc.

Le tablier du pont est suspendu à l'arc à l'aide de 34 câbles d'acier de 48 mm de diamètre. Les câbles sont fixés à l'arc par des plaques d'ancrage noyées dans le béton. Au niveau du tablier, les câbles sont fixés à l'extrémité en porte-à-faux des poutres transversales formant le tablier. Il est à noter que les poutres transversales constituent l'ossature principale du tablier pour ce pont, contrairement aux ponts usuels où ce rôle est joué par les poutres longitudinales. La charpente métallique est composée de 24 poutres transversales à la route, deux poutres longitudinales continues, situées en rive, et d'un diaphragme situé au centre. Les poutres du tablier sont composites avec une dalle en béton de 300 mm d'épaisseur. Les figures 1, 2 et 3 montrent respectivement la coupe transversale du tablier, la vue en plan et la vue en élévation du pont.

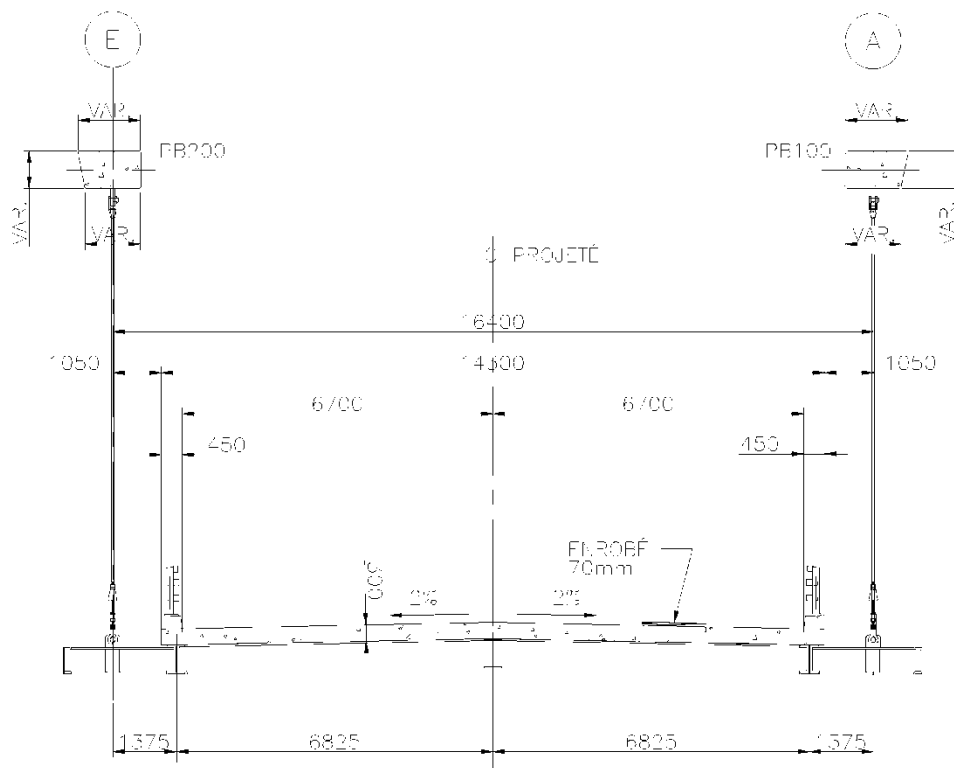


Figure 1 - Coupe transversale du tablier

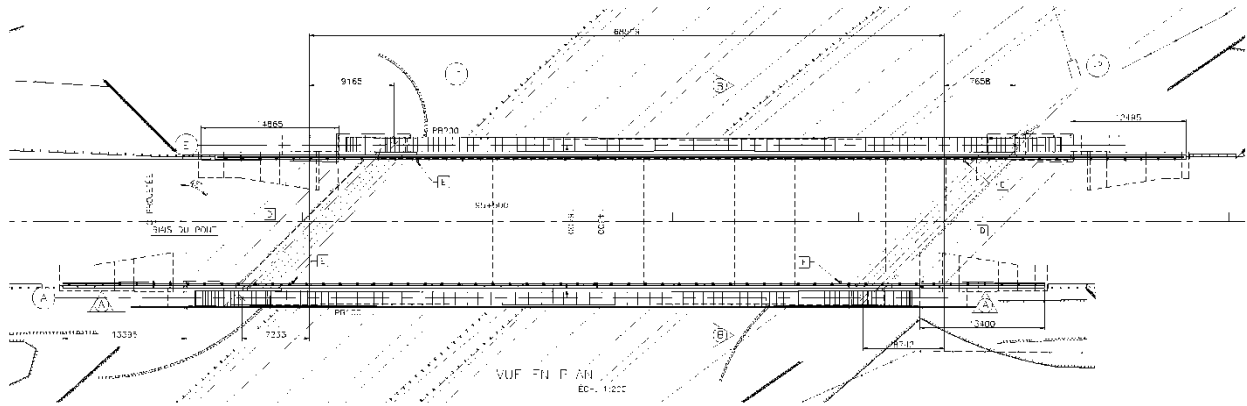


Figure 2 - Vue en plan

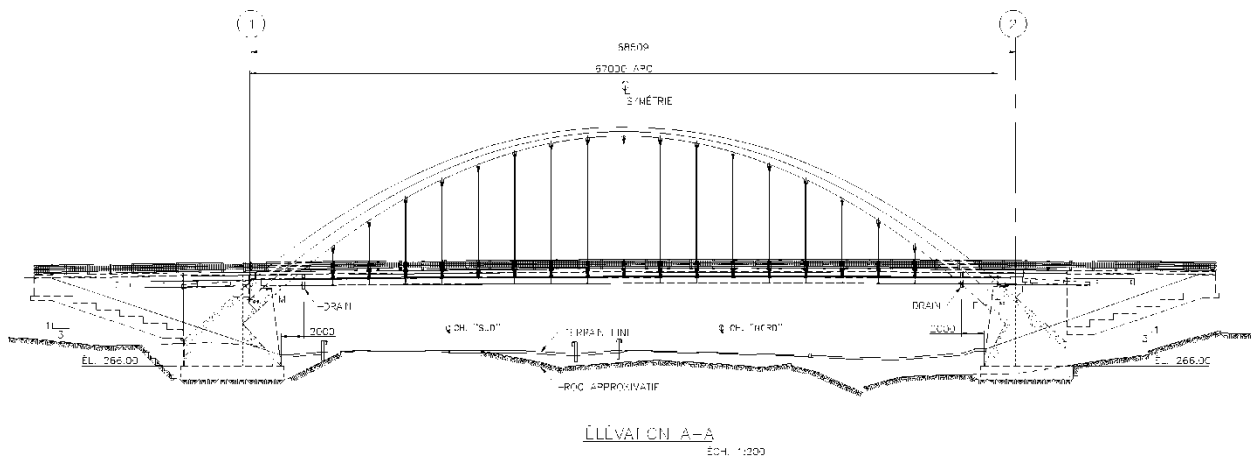


Figure 3 - Vue en élévation

3. CONCEPTION

3.1. Conception du tablier

Le tablier de ce pont présente des particularités qui distinguent sa conception de celles d'un tablier standard. Premièrement, comme il est mentionné précédemment, les poutres principales du tablier sont transversales à l'axe longitudinal du pont. Ces dernières sont fixées aux câbles porteurs reliés aux arcs. Les points de fixation aux extrémités des poutres transversales se déplacent donc en fonction de la déformation des câbles et des arcs. Contrairement à un pont standard où les poutres se déforment progressivement en fonction de l'avancement d'un camion sur le pont, les poutres transversales du tablier sont chargées à chaque passage d'essieu d'un camion. Le déplacement d'un camion engendre une charge à une première poutre transversale et, au fur et à mesure qu'il avance sur le pont, le camion charge successivement les poutres suivantes. Conséquemment, les câbles et les arcs se déforment progressivement selon le positionnement des charges mobiles sur le tablier, générant ainsi des déformations et des vibrations au niveau de l'ossature.

La conception du tablier a donc été réalisée afin d'éviter des déformations importantes entre les poutres principales sous le passage d'un camion, car celles-ci pourraient provoquer une problématique d'endommagement prématuré du pont par fatigue. De plus, les vibrations du tablier ont été analysées et la conception de la charpente métallique a été ajustée pour que les vibrations ne causent pas d'inconfort aux usagers.

Afin d'augmenter la rigidité longitudinale et limiter la vibration du tablier, des poutres longitudinales ont été intégrées à la structure d'acier, soit au centre et en rive de la dalle. Les poutres en rive sont continues et contreventent les poutres transversales. Ainsi, leurs dimensions ont été ajustées pour donner la rigidité nécessaire au tablier. En contrepartie, l'intégration à la structure d'acier des poutres longitudinales a rendu nécessaire la mise en place de joints de construction dans les poutres transversales. Ces joints ont été conçus pour reprendre des efforts auxquels ils sont soumis et il est intéressant de noter que ces efforts sont plus élevés que ceux présents sur les poutres transversales.

Dans un second temps, la conception de la dalle de béton a nécessité des vérifications particulières pour s'assurer du bon comportement du tablier, notamment en service. En plus des exigences habituelles en terme de résistance aux efforts et aux critères de fissuration, la contribution bénéfique de la dalle à la masse du tablier a permis de limiter l'amplitude des vibrations du tablier et de diminuer la période du pont. Notamment pour cette raison, l'épaisseur de la dalle a été augmentée par rapport aux épaisseurs habituelles (200 ou 225 mm), et a été établie à 300 mm. Cette épaisseur de la dalle contribue également à rigidifier le tablier entre chaque poutre transversale.

Mentionnons enfin que la conception des poutres principales est similaire à une poutre standard, et ce, même si elles sont transversales à la route. La cambrure de ces poutres a été ajustée comme une poutre standard. Toutefois, l'ajustement de l'élévation de l'extrémité des poutres par les câbles tient compte de la déformation de l'ensemble du pont. Cette étape a nécessité beaucoup d'attention lors de la réalisation des travaux, tel que décrit à la section 4.1.

3.2. Câble et système d'attache des câbles

La conception du tablier et des câbles a été conçue de manière à ce que la fonctionnalité du pont soit maintenue advenant qu'un accident survienne sur le pont provoquant la rupture de l'un des câbles servant à supporter le tablier. Lors d'un tel événement, le gestionnaire de l'ouvrage aurait alors tout le temps voulu pour procéder au remplacement du câble en question sans devoir restreindre la circulation sur le pont. Notons que l'ouvrage pourrait aussi supporter la perte de deux câbles sans qu'il n'y ait de risque d'effondrement du tablier. Cependant, des mesures de restriction des charges devraient alors être mises en œuvre le temps de réaliser les réparations requises.

Le choix du type de câble et du diamètre de ce dernier a été fait en fonction des charges qu'il doit reprendre sous les divers cas de chargement. La capacité à l'ultime des câbles et embouts spécifiée aux plans est de 1215 kN. Pour obtenir ces spécifications en respectant les critères de la norme ASTM A586 « Standard specification for Zinc-Coated Parallel and Helical Steel Wire Structural Strand », un câble de 1 7/8" de diamètre a été choisi. L'acier est de grade 2 et les

câbles sont composés de fils hélicoïdaux pré-étirés. Ce type de câbles pour le pont doit être préétirés afin que la déformation initiale dans les câbles soit très faible une fois en service.

3.3. Conception sismique du tablier

Bien que la structure soit assimilable à une travée simple, la norme S6-06 n'exige pas d'analyse sismique, sauf pour les dispositifs d'assemblage. Toutefois, considérant les particularités du système structural de l'ouvrage, une analyse spectrale multimodale a été réalisée, et ce, pour une catégorie d'importance des ponts de secours. Les efforts sismiques et les déplacements au niveau des appuis sont particulièrement complexes à analyser compte tenu du biais important de la structure. Les résultats des analyses réalisés ont démontré que l'ordre de grandeur des efforts générés par les charges sismiques est relativement peu élevé. Toutefois, considérant que les charges mortes (verticales) sur les appuis sont très faibles, les efforts sismiques ne peuvent être entièrement repris par les appareils d'appuis.

Pour s'assurer de reprendre les efforts et limiter les déplacements sous les charges sismiques, des butoirs ont été intégrés au niveau de la culée fixe. Le défi consistait à concevoir un système de butoirs en tenant compte de la géométrie du tablier et de l'espace restreint au niveau des assises. De plus, le système de butoir devait permettre le remplacement des appuis. C'est pourquoi des butoirs constitués de cornières raidies en acier, ancrées dans l'assise de la culée, ont été conçus pour reprendre les efforts dans la direction longitudinale. Lors d'un séisme, les boulons de type fusible installés sur les appuis fixes, et limitant les mouvements en conditions de service, céderont sous une charge de rupture prédéterminée. Ces butoirs ont été conçus pour être actifs après un mouvement des appuis de 2 mm. Transversalement, les efforts sismiques sont repris par la butée de la dalle sur la base des arcs en béton. Des détails particuliers ont été prévus à cet effet sur les côtés extérieurs de la dalle et sur les faces intérieures des arcs pour accommoder la butée de ces éléments. Des plaques de glissement en inox sont encastrées dans ces éléments en béton pour éviter leur endommagement en cas de séisme. L'espace libre entre le tablier et la face intérieure des arcs est limité à 10 mm.

3.4. Appareil d'appui

Les appareils d'appui sont constitués d'élastomère fretté conventionnel, avec éléments glissants pour les appuis mobiles. Toutefois, leur conception a nécessité une attention particulière pour tenir compte des charges de soulèvement possibles sous certains cas de chargement, principalement dans les coins aigus du tablier. Mentionnons que le tablier est suspendu par les câbles et que les charges mortes sur les appareils d'appui sont relativement faibles. De ce fait, les charges sur les appuis sous le passage de camions sont pratiquement nulles, laissant même apparaître des charges de soulèvement sous certains cas de chargement spécifiques. Pour éviter l'apparition de problème de comportement des appuis, ceux-ci ont été conçus pour reprendre des efforts de soulèvement. À cet effet, l'ajout de coussins en élastomère de type EF a été intégré aux tiges d'ancrages de fixation aux plaques supérieures des appuis.

4. CONSTRUCTION DU TABLIER

La construction du tablier de ce pont est particulière puisque le comportement structural est différent d'un pont conventionnel.

Considérant qu'il s'agit d'un tablier suspendu à l'aide de câbles, les étapes de construction pour ériger l'ossature impliquent la prise en compte de la déformation des câbles. Mentionnons que la longueur des câbles est variable dépendamment de leur localisation sous les arcs, ce qui fait en sorte de faire varier la déformation (élongation) respective de chacun d'eux sous les charges. Pour pallier à cette situation, l'ajustement individuel de chacun des câbles a été nécessaire pour que l'élévation de l'extrémité des poutres s'harmonisent avec le profil final sur le pont, et ce, une fois après avoir complété tous les travaux. Pour y arriver, les déformations des câbles, des arcs et de la charpente d'acier ont dû être anticipées et prises en compte durant l'étape de construction du tablier.

4.1. Mise en place et ajustement de la structure d'acier

La mise en place de la structure d'acier a débuté par la mise en place des câbles en attachant la partie supérieure au système d'ancrage fixé dans l'arc (voir figure 4). Les câbles ont été installés d'une extrémité du pont jusqu'au premier joint de chantier situé dans les poutres de rive. L'installation de ce type de câble nécessite des précautions afin de toujours conserver l'alignement des brins du câble et ainsi conserver la capacité du câble. Pour ce faire, une table tournante est utilisée pour dérouler les câbles qui sont livrés sur rouleaux. De plus, une ligne rouge est peinte sur le câble indiquant l'axe que le câble doit conserver. Par la suite, les poutres de rive et les sections en porte-à-faux des poutres principales qui étaient préassemblées ont été installées. Les porte-à-faux ont été fixés aux câbles avec le système d'attache montré sur la figure 5. Les poutres de rive reposaient également sur des supports temporaires et ajustés à l'élévation désirée. Les poutres principales reliant les poutres de rives ont ensuite été mises en place entre les poutres de rive. Après l'installation de cette première section, l'entrepreneur a procédé à l'ajustement de l'élévation de chaque extrémité des poutres. Ces étapes ont été répétées pour chacune des sections de la structure d'acier.



Figure 4 : Système d'attache supérieure des câbles

Figure 5 : Système d'attache inférieure des câbles

Une fois toutes les sections d'acier en place et le boulonnage final réalisé, l'entrepreneur a procédé à un ajustement final des élévations à chaque extrémité de câble. De plus, une procédure a été réalisée afin de s'assurer que tous les câbles avaient une tension minimale. Cette procédure consistait à réaliser un serrage des écrous du système d'attache à l'aide d'une clé dynamométrique. Une vérification a également été faite afin de valider que la tension minimum des câbles n'est pas influencée par l'ajustement d'un câble adjacent.

4.2. Coffrage et bétonnage de la dalle

À la suite de l'installation et de l'ajustement de la structure d'acier, la construction du coffrage de la dalle a débuté. L'ajustement de l'élévation du coffrage est également un aspect particulier, car la déformation du tablier est différente d'un pont usuel. Comme il est mentionné précédemment, la déformation du tablier est en fonction de la déformation des poutres principales, des câbles et des arcs. Cet aspect a donc un impact important sur le calcul de l'ajustement des goussets qui doit être réalisé en fonction des déformations anticipées du tablier.

Par ailleurs, le passage à vide à l'aide de la Gomaco a nécessité des modifications par rapport au passage à vide standard. Les modifications ont été nécessaires puisque la Gomaco circule perpendiculairement à l'axe des poutres principales. Compte tenu de l'espace restreint et pour simplifier l'ajustement des rails et des coffrages, les rails ont été positionnés sur la poutre de rive qui est située vis-à-vis le chasse-roue, et qui, rappelons-le n'est pas une poutre principale. Une fois le rail et la Gomaco ajustés, le passage à vide a débuté. Comme la déflexion des poutres sous les charges mortes ne s'est pas encore produite lors du passage à vide, la déflexion anticipée des poutres doit être prévue à chaque endroit sur la poutre. Ainsi, le passage à vide s'est effectué à chaque cinquième de portée de la poutre principale avec des gabarits d'espace variant de 55 mm en rive et de 38 mm au centre. Ce gabarit est ajusté en fonction de la déflexion des poutres principales sous les charges mortes anticipées.

Le bétonnage de la dalle s'est effectué de façon standard à l'exception de la quantité de béton frais mis en place devant la Gomaco. Il a été exigé à l'entrepreneur qu'il y ait toujours un minimum de 6 m de béton frais mis en place à l'avant de la Gomaco afin de que la déformation des poutres et des câbles soit réalisée lors du passage de la Gomaco. Ainsi, l'épaisseur de la dalle est constante et les armatures dans le béton frais ne bougent pas dans lors de la finition du béton. Pour s'assurer que le béton en surface ne soit pas trop raide pour la finition, l'entrepreneur remplissait les coffrages jusqu'au rang d'armature du haut sur 6 m et il venait compléter la partie manquante juste devant la Gomaco.

Enfin, un relevé final du profil a été réalisé suite à la mise en place du pavage et toutes les déformations anticipées se sont avérées justes puisque le profil respecte bien celui anticipé.

5. ARCHITECTURE

Dans le cadre de ce projet, les services d'un architecte ont été retenus afin de conseiller le concepteur sur les formes à donner aux constituants du pont et, le cas échéant, l'ajout d'éléments. Des recommandations émises par l'architecte, essentiellement trois modifications et ajouts, ont été retenus par le concepteur et le Ministère à la suite d'une analyse des coûts et d'une vérification des incidences de ces modifications sur la durabilité et l'entretien de l'ouvrage. Le mur de front des culées a été incliné, le sommet étant en retrait par rapport à la base. Tout en conservant les dimensions brutes arrêtées par le concepteur, la section des arcs a été modifiée en élargissant de 150 mm la surface supérieure des arcs. La face extérieure des arcs est ainsi inclinée. Finalement, une plaque de couleur contrastante a été ajoutée à l'extrémité des porte-à-faux du tablier. La figure 6 montre une photo d'ensemble du pont avant le bétonnage de la dalle où les modifications proposées sont visibles.



Figure 6 - Vue d'ensemble du pont

6. CONCLUSION

En conclusion, ce projet a été un défi d'ingénierie tant au niveau de la conception que de la construction de l'ouvrage. Ce type de pont est inusuel et cet article présente les particularités de la conception et de la construction. Malgré ces particularités, la construction du pont s'est bien déroulée et les résultats correspondent aux attentes.

Enfin, la réalisation d'un tel ouvrage 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 (Entreprise Alfred Boivin) qui a coordonné les travaux, à Coffrage Provincial qui a réalisé les coffrages et la mise en place du béton, à ABF qui a fourni et installé l'armature, à LVM, le laboratoire de contrôle des matériaux, au ministère des Transports ainsi qu'à l'équipe de surveillance des travaux (CIMA+).