

CONSTRUCTION D'UN PONT EN ARC À TABLIER INFÉRIEUR SUR LE BOULEVARD TALBOT AU-DESSUS DE L'AUTOROUTE 73 À STONEHAM-ET- TEWKESBURY – PARTIE 1 : FONDATIONS ET ARCS

**F. Paradis, ing. Ph. D., P. Dandois, ing. M. Sc., Y. Maltais, ing. Ph. D.
et J-P Perron, ing. M. Sc.
CIMA+, 1145 boul. Lebourgneuf, bureau 300, Québec, Canada, G2K 2K8**

RÉSUMÉ

Cet article discute de la conception et des particularités de la construction d'un pont d'étagement en arc à tablier inférieur érigé en 2010-2011 dans le cadre de la réalisation de la route à quatre voies et chaussées séparées reliant Québec et Saguenay (axe routier 175/73). Situé dans la municipalité de Stoneham-et-Tewkesbury au nord de Québec, ce pont d'étagement possède une travée de 68,5 mètres, une largeur de 16,0 mètres et un biais de 45 degrés. Les arcs sont en béton armé et s'élèvent sur une hauteur de 21 mètres, mesurée de leur base à leur cime. Considérant le caractère peu commun de ce type d'ouvrage dans le paysage québécois, une firme d'architectes fut mandatée pour accompagner l'équipe de concepteurs dans l'élaboration de détails visant à mettre en valeur l'esthétisme de la structure.

Les raisons qui ont motivé la décision d'ériger un pont en arc sur ce tronçon du boulevard Talbot (route 175) sont exposées dans la première partie de l'article. Par la suite, le choix de la géométrie des arcs et les particularités de leur conception sont abordés. Le comportement de ce type de pont sous les différentes charges susceptibles de le solliciter au cours de sa vie utile (charges thermiques, sismiques, etc.) est également discuté. Finalement, les méthodes de construction et les difficultés inhérentes à la construction d'un tel type d'ouvrage sont présentées.

1. INTRODUCTION

Le projet de construction de l'axe routier 73/175 comprend la réalisation d'une route à quatre 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 devrait être pratiquement complété dès 2011, plusieurs ouvrages d'art ont dû être 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.

Cet article présente tout d'abord les principaux éléments qui ont amené CIMA+ à recommander au ministère des Transports la construction d'un pont en arc en béton à tablier inférieur. Par la suite, la géométrie et les principales caractéristiques des différents éléments structuraux constituant ce pont sont présentées. Plus particulièrement, la conception des fondations et des arcs en béton est discutée à travers les choix qui ont été privilégiés par l'équipe de concepteurs tout au long du projet. Les méthodes de construction retenues par l'entrepreneur sont aussi présentées. Enfin, les détails architecturaux visant à mettre en valeur cet ouvrage d'art peu commun sont finalement décrits.

2. ÉTUDE DE CONCEPTS : 2005 À 2007

Un mandat d'étude de concepts a été confié à CIMA+ par la Direction de la Capitale-Nationale du ministère des Transports entre 2005 et 2007 afin d'identifier le type de structure le plus approprié pour permettre au boulevard Talbot d'emjamber la future autoroute 73 au kilomètre 69+440. Afin d'identifier le type de structure en question, les contraintes devant être considérées préalablement à la conception de l'ouvrage ont été identifiées et analysées. Ces contraintes sont discutées à la section suivante.

2.2.1 Identification des contraintes propres au site

Considérant le tracé établi par le Ministère, il appert que le boulevard Talbot croise la future autoroute 73 avec un biais fort important de 49 degrés. Suite à l'intégration des contraintes de dégagement horizontal imposées pour assurer le respect des distances de visibilité aux usagers, il a rapidement été établi par CIMA+ que le biais de 49 degrés aurait pour effet d'imposer une portée appréciable de près de 68 mètres à la structure projetée (pont P-11668).

Par ailleurs, comme la future autoroute 73 sera encavée dans le roc, la géométrie du site imposant une telle contrainte, il est rapidement devenu évident que l'épaisseur du tablier du pont projeté devait être limitée afin de minimiser les quantités de roc à excaver, à défaut de quoi le profil du boulevard Talbot et/ou celui de la future autoroute 73 devait alors être modifié. Dans les deux cas, les coûts associés à de telles modifications de profil avaient alors été jugés trop importants pour que l'une ou l'autre de ces solutions soient retenues dans l'étude de concepts.

2.2.2 Ouvrages considérés et concept retenu

2.2.2.1 Pont de type dalle sur poutres avec pile centrale

Pour des raisons économiques, le premier concept de structure considéré a été celui d'un pont de type « dalle sur poutres » avec une pile située dans le terre-plein séparant les deux voies de l'autoroute projetée. Avec un tel concept de structure, soit un pont à deux travées de près de 68 mètres de portée, ce sont les contraintes de dégagement horizontal visant le respect des distances de visibilité qui ont dicté la géométrie et la localisation de la pile. En fait, en raison de considérations liées à la conception de la voirie, il a été établi qu'il ne pouvait y avoir rotation de la pile, car celle-ci entraînerait un important élargissement du terre-plein. Un tel élargissement aurait pour effet de modifier le tracé proposé de l'autoroute 73 et d'entraîner une augmentation importante des quantités de roc à excaver. Ce scénario n'était donc pas envisageable pour le Ministère. Notons qu'une rotation de la pile aurait toutefois permis de réduire sensiblement les difficultés techniques associées à la construction d'un tablier appuyé sur une pile ayant un biais de 49 degrés.

Par ailleurs, selon le tracé proposé, l'autoroute 73 présente une pente et une courbure appréciables, bien que respectant les normes applicables à l'endroit où elle croise le boulevard Talbot. La construction d'une pile dans le terre-plein requiert donc la construction de près de 600 mètres de New-Jersey le long de la voie nord afin de protéger les usagers en cas de dérapage vers cette pile. La construction de ces 600 mètres de New-Jersey représente un coût non négligeable dans le projet.

L'ensemble de ces contraintes a alors amené les concepteurs de CIMA+ à analyser d'autres concepts de structure.

2.2.2.2 Pont de type dalle sur poutres sans pile centrale

Un pont de type dalle sur poutres d'une seule travée de 68 mètres a aussi été considéré par l'équipe de concepteurs, mais rejeté rapidement par celle-ci en raison de la profondeur importante du tablier requis (>2 mètres.). En fait, la construction d'un tel ouvrage a été jugée non économique en raison de la nature même de l'ouvrage (poutres très profondes requises) qui demande des modifications aux profils du boulevard Talbot et/ou de l'autoroute 73 pour obtenir le dégagement vertical minimal requis pour ce projet.

2.2.2.3 Pont en arc à tablier inférieur

En regard de ce qui précède, l'équipe de concepteurs de CIMA+ a proposé au Ministère un concept de pont en arc à tablier inférieur (pont de type 72 selon la nomenclature du MTQ). La construction d'un pont de ce type permet d'éviter d'implanter une pile dans le terre-plein central de l'autoroute et de modifier les profils proposés de l'autoroute 73 et du boulevard Talbot en raison de la faible profondeur de ce type de tablier. Par ailleurs, de la suppression de la pile découlent les avantages suivants :

1. L'élimination des contraintes relatives au biais, le biais étant imposé par la pile;
2. La pile ne ferait plus entrave à la visibilité, ainsi la sécurité des usagers serait augmentée;
3. Les 600 mètres de New-Jersey le long de la voie nord seraient éliminés et remplacés par une glissière souple. Une économie importante serait ainsi réalisée. De plus, les opérations de déneigement seraient facilitées et le drainage des eaux de pluie simplifié;
4. L'élimination d'un objet fixe, le New-Jersey et la pile, augmenterait la sécurité des usagers.

De plus, il est important de noter que les conditions du site sont propices à la construction d'un pont en arc puisqu'à cet endroit le roc n'est pas très profond et de bonne qualité.

Considérant les avantages et inconvénients associés à chacun des concepts de pont considérés par l'équipe de concepteurs, le ministère des Transports a décidé de retenir le concept de pont en arc à tablier inférieur pour la construction du pont P-11668 sur la route 175 au km 69+440.

3. PRÉSENTATION DU PONT

Tel que mentionné précédemment, le pont est situé sur le boulevard Talbot et enjambe la future autoroute 73 avec un biais de 49 degrés. Les culées ont toutefois été orientées avec un biais de 45 degrés par rapport à l'axe du pont afin de minimiser les risques d'erreur de cote au chantier. Actuellement, trois voies de circulation sont en opération sur le boulevard Talbot et devront être conservées opérationnelles durant la construction de l'autoroute 73. Cette exigence impose une largeur carrossable de 13,4 mètres pour le nouveau pont. À terme, le pont comportera deux voies de circulation. La largeur hors tout du pont, incluant les arcs et les porte-à-faux, est de 18,5 mètres. La portée du pont d'un axe à l'autre est de 68,5 mètres.

L'arc a une forme parabolique de type funiculaire. La hauteur de l'arc par rapport au tablier est d'environ 14 mètres et de 20 mètres par rapport au niveau de l'autoroute 73. La section de l'arc est variable passant de 800 x 1 200 mm au sommet à 1 500 x 2 400 mm à sa base. L'arc est encastré à la base dans un massif intégré aux culées. L'ensemble massif-culée prend appui sur le roc et résiste aux efforts de renversement et de glissement induits par les arcs avec leur poids et par friction respectivement.

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

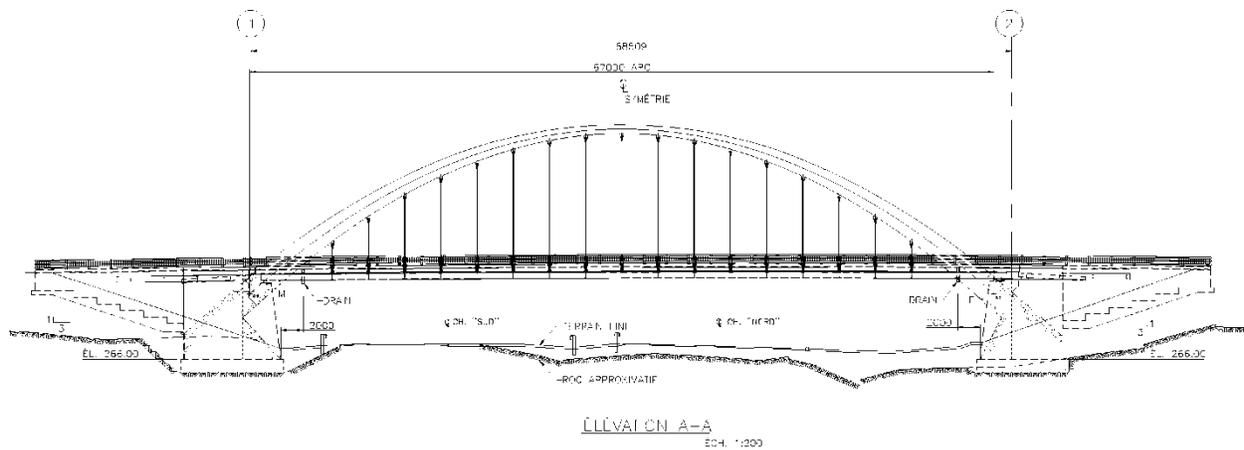


Figure 3 - Vue en élévation

4. CONCEPTION

4.1. Conception des arcs

Les ponts en arc sont regroupés en trois types selon la position du tablier par rapport à l'arc, soit : à tablier supérieur, inférieur et intermédiaire. Pour le pont du boulevard Talbot, des considérations topographiques et le dégagement vertical minimal à respecter sous celui-ci imposent l'emploi d'un arc à tablier inférieur. Ainsi, le tablier est suspendu sous deux arcs, ceux-ci sont les éléments porteurs principaux de la structure. Deux matériaux ont été étudiés pour la composition des arcs, soit le béton armé et l'acier. Lors de l'étude de concepts, l'emploi de ces deux matériaux n'ayant pas démontré d'avantages particuliers en constructibilité, entretien et durabilité, le choix repose donc sur des considérations économiques. Pour ce projet, l'emploi d'arc en béton armé étant plus économique, ce matériau fut retenu.

Une des premières étapes de la conception des arcs a été d'établir le nombre de rotules qui y seront intégrées. Historiquement, les arcs en béton armé ont souvent été construits avec deux ou même trois rotules (Favre et coll. 2000). Ces rotules permettent de recentrer la résultante de compression et de pratiquement éliminer les efforts de flexions induits par les variations volumétriques (retrait, fluage, variation thermique, etc.) de l'arc. Toutefois, la présence de ces rotules est susceptible d'entraîner, comme toute discontinuité dans un élément en béton, une diminution de la durabilité des arcs. Par conséquent, la réalisation d'un arc monolithique sans rotule a été retenue. L'absence de rotule a toutefois l'inconvénient, tel que mentionné plus haut, d'induire des efforts de flexion significatifs à la base des arcs.

La géométrie des arcs a été optimisée afin de minimiser l'amplitude des efforts de flexion induits à sa base dus à l'absence de rotules. Cependant, il fut impossible d'éliminer complètement ces efforts de flexion provenant de l'effet des charges et des déformations imposées. Les principaux effets auxquels les arcs sont soumis sont le retrait, le fluage, les variations thermiques, les charges des tirants provenant du tablier (morte et de voie), les charges sismiques et le poids propre de l'arc. La forme retenue est une forme parabolique de type funiculaire. Ce type de forme permet de minimiser les efforts de flexion provenant des charges de gravité. L'équation de la forme de l'arc est la suivante : $y = 4h/L^2$. La base de l'arc est considérée à l'élévation 0,0 telle que montrée sur la figure 3 et correspond à l'encastrement des extrémités de l'arc, soit la jonction

entre celui-ci et les unités de fondation (culées et massifs des arcs). Le rapport entre la hauteur et la portée de l'arc a été fixé à 0,20. Cette valeur entre dans les barèmes que Troistky (1994) propose où il mentionne que la plupart des ponts en arc ont un rapport hauteur/portée compris entre 0,15 et 0,30.

Afin d'évaluer le comportement du pont sous les différentes charges, un modèle complet du tablier et des arcs a été généré dans le logiciel Visual Design. La figure 4 montre le modèle final utilisé. Il est à noter que pour simuler le comportement (déformation et efforts) dans les arcs, les étapes de construction ont été simulées à l'aide de différents modèles. En fait, un modèle a été créé pour chacune des étapes de construction, soit la construction des demi-arcs, l'application du prémoment (discuté plus loin), la mise en place de la structure d'acier et le bétonnage de la dalle et, finalement, le pont en service. La réalisation d'un modèle pour chacune des étapes était nécessaire afin séparer les charges et déformations imposées des différentes parties de l'ouvrage en fonction de l'avancement des travaux. Ainsi, les déformations obtenues à chaque étape de construction sont intégrées dans le modèle suivant afin d'obtenir une simulation la plus parfaite de la réalité et ainsi cerner les sources de tout effort parasite.

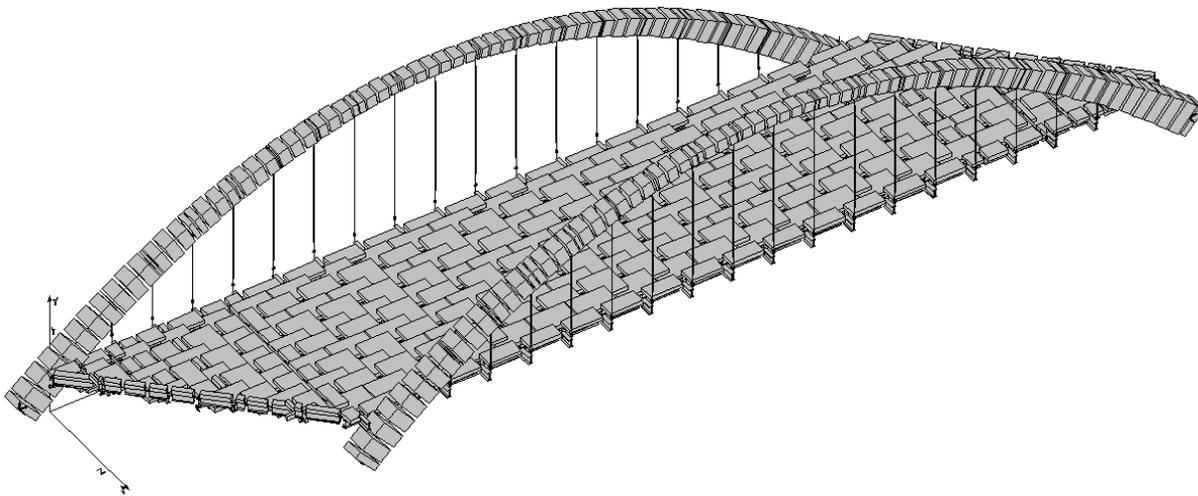


Figure 4 - Modèle final du pont

Malgré l'utilisation d'une forme funiculaire, forme minimisant l'amplitude des efforts de flexions générés, des efforts de flexion très importants sont générés à la base des arcs. Les figures 5 et 6 montrent respectivement les moments et les déformations (déformation amplifiée) auxquels un arc est soumis sous l'enveloppe des charges ultimes. Les efforts de flexion les plus importants sur les arcs proviennent des variations volumétriques (variations thermiques, retrait, fluage) qui représentent environ 45 % des moments à la base des arcs. Les variations thermiques comptent à elles seules pour 25 % des efforts.

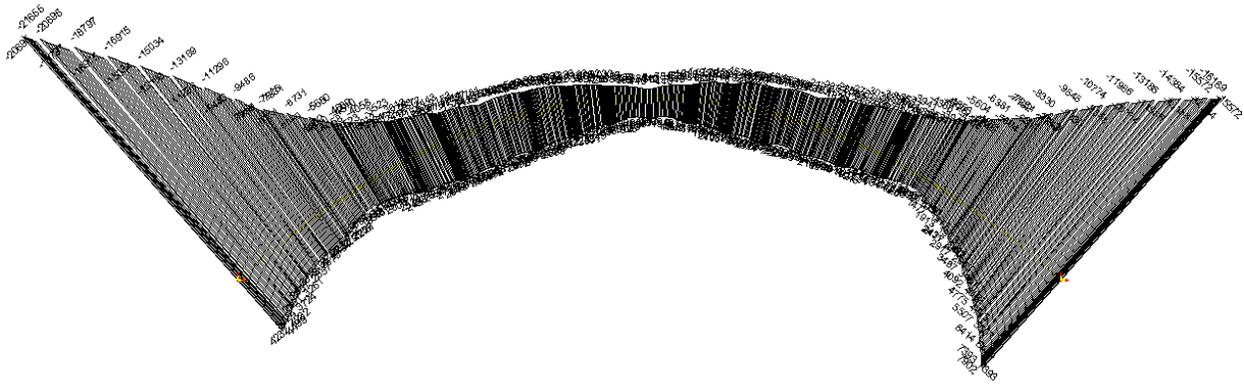


Figure 5 - Enveloppe à l'ultime des moments sur un arc

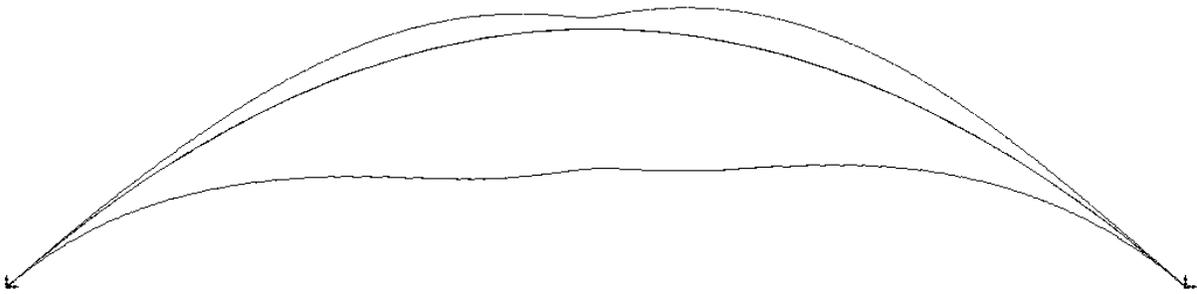


Figure 6 - Enveloppe à l'ultime des déformations sur un arc

Comme la figure 5 le montre, les moments à la base des arcs sont les plus importants et sont débalancés, c'est-à-dire que le moment négatif est plus élevé, en valeur absolue, que le moment positif. La magnitude de l'effort ne pose pas problème à l'ultime. Toutefois, en service, le critère d'ouverture des fissures n'est pas respecté. Afin de respecter ce critère à la base des arcs, deux options ont été étudiées. La première consiste à appliquer aux pieds de l'arc une post-contrainte désaxée permettant ainsi de fermer les fissures et d'équilibrer les moments positif et négatif. La deuxième option qui a été retenue consiste à appliquer une charge horizontale à la cime de l'arc entre les deux demi-arcs. La charge appliquée permet d'équilibrer les moments positif et négatif au pied de l'arc et ainsi respecter le critère d'ouverture des fissures. Ainsi, il est spécifié aux plans et devis d'interrompre la construction des arcs et de laisser une ouverture de 1,5 mètre à leur sommet. À cet endroit, un vérin est mis en place afin d'ouvrir l'arc, ou de repousser les deux demies de l'arc. La charge appliquée a été fixée par calcul à 260 kN, ce qui génère un moment de 3 900 kN-m à la base des arcs. L'ampleur du moment a été déterminée afin d'équilibrer les moments positif et négatif. Cette méthode a déjà été utilisée dans le cadre d'autres projets, tel que décrit par Nettleton et Torkelson.

L'étude de la stabilité latérale des arcs a fait l'objet d'une attention particulière. Les efforts de vent ainsi que les efforts sismiques ont été analysés en détail. L'analyse sismique a été faite en considérant un pont de secours. Le coefficient de modification de réponse R a été fixé à 1 puisqu'aucune rotule plastique ne peut être tolérée dans l'arc. L'enveloppe des efforts sismiques générés dans l'arc dans le sens longitudinal du pont représente environ 45 % des efforts de l'enveloppe à l'ultime. Les efforts sismiques longitudinaux ne sont donc pas critiques dans la conception des arcs du pont. Toutefois, les efforts sismiques sont le facteur contrôlant la conception des arcs au niveau transversal du pont. Une analyse non linéaire a été réalisée et les effets P-delta ont été inclus dans l'analyse. Le tablier étant retenu par des câbles fixés à l'arc et le tablier se déplaçant transversalement d'environ 25 mm sous un séisme, ce mouvement a dû être inclus dans l'analyse P-delta de l'arc. En effet, il y a un désalignement du câble par rapport au centre de l'arc sous un séisme. Les effets P-Delta engendrent une augmentation des efforts d'environ 5 % par rapport à une analyse linéaire. La conception de la base des arcs au niveau transversale est donc contrôlée par les charges sismiques transversales.

En fonction des charges sur les arcs et la dimension de ceux-ci, le ferrailage a été détaillé. Pour la géométrie préliminaire des arcs, les ratios portée/section des arcs fournis dans la littérature ont été utilisés (Nettleton et Torkelson). Suite à une optimisation, la largeur d'un arc a été fixée à 1,5 mètre à la base variant à 1,2 mètre au sommet. La profondeur de la section passe de 2,4 mètres à la base à 0,8 mètre à la cime. Compte tenu du fort biais (45 degrés) et pour des raisons esthétiques, il fut décidé de concevoir des arcs indépendants l'un de l'autre, c'est-à-dire qu'aucun élément ne lie ensemble les arcs. Finalement, la conception des arcs a été faite en assimilant ceux-ci comme un poteau-poutre (éléments en compression-flexion).

4.2. Conception des éléments de fondation

Les unités de fondation sont composées d'un ensemble culée standard en béton armé et d'un massif de chaque côté de celle-ci qui permet l'encastrement et le support des arcs. Les massifs sont joints et solidaires du mur de front afin que l'ensemble culée-massifs travaille de façon monolithique. Les unités fondation sont appuyées sur le roc et leur glissement est empêché par la friction entre le roc et la semelle. Les dimensions des massifs ont été établies afin de permettre le développement d'un encastrement de la base des arcs. Les massifs sont en béton armé et mesurent environ 3 mètres de largeur x 8 mètres de longueur x 4 mètres de hauteur. Il est à noter qu'aucun ancrage au roc n'est requis pour résister au renversement et glissement des arcs. Les extrémités du tablier sont simplement appuyées sur des culées. La base des arcs à la hauteur du tablier a été ajustée afin de servir de butoir transversal au tablier en cas séisme. Les arcs sont conçus pour reprendre la totalité des efforts sismiques transversaux du tablier.

5. CONSTRUCTION

5.1. Construction des unités de fondation

La construction des unités de fondation a débuté par l'excavation et le nettoyage du roc. Un coussin de support a d'abord été mis en place suivi par le bétonnage des semelles de l'ensemble culée-massifs. Le coffrage de cet ensemble a ensuite été réalisé de façon monolithique. La construction de ces coffrages fut complexe compte tenu du fort biais et de la géométrie biscornue des massifs, aux pressions importantes créées sur les coffrages lors du bétonnage (10 m de hauteur de béton) et des coffrages en surplomb des massifs et des arcs. Afin d'assurer une mise en place du béton adéquate et une qualité de surface acceptable, les panneaux de coffrage en surplomb ont été installés au fur et à mesure du bétonnage. Des précautions ont donc été prises afin d'assurer une résistance suffisante des coffrages et une méthode de mise en place rapide des coffrages en surplomb afin de ne pas ralentir la cadence de bétonnage.

La solution retenue fut l'emploi de panneaux de coffrage en surplomb possédant une largeur de 600 mm retenus par des tirants perpendiculairement à ces derniers. Ces panneaux ont tous été fabriqués, installés à l'avance, ajustés, numérotés et démontés avant le bétonnage. Les panneaux ont été recouverts de doublure de coffrage pour limiter la présence de vides d'air en surface. La procédure de bétonnage consistait à installer un panneau de 600 mm de largeur et à bétonner cette section de coffrage. Cette opération est répétée jusqu'au joint de construction entre les massifs et les arcs.

Par ailleurs, le volume de béton entrant dans la construction de l'ensemble culée-massifs d'une unité de fondation est d'environ 450 m^3 . Le bétonnage de cet élément est donc une coulée d'importance qui a pris près de 12 heures. Cette quantité importante de béton a donc imposé le contrôle de sa température afin d'assurer une bonne durabilité au matériau. Il est rappelé qu'une température trop élevée du béton peut créer des problématiques de durabilité comme la formation d'ettringite secondaire. Le bétonnage des éléments de fondation ayant été effectué dans une période exceptionnellement chaude de l'été 2010, afin d'assurer une qualité de l'ouvrage, une vérification du dégagement de température a été évaluée théoriquement en fonction de la formule de mélange de béton utilisée. Ainsi, théoriquement, le dégagement de température de cette formule était de l'ordre de $48 \text{ }^\circ\text{C}$. Afin que le béton n'atteigne pas une température supérieure à $65 \text{ }^\circ\text{C}$ (température à laquelle le risque de formation d'ettringite secondaire est possible), la température du béton à l'arrivée au chantier devait être inférieure à $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Pour contrôler la température du béton, une quantité importante de glace (90 kg/m^3) a été utilisée. Pour valider les températures et faire le suivi du béton au chantier, des thermocouples ont été installés au cœur et en surface des ouvrages. Le suivi des thermocouples a démontré que les calculs théoriques du dégagement de chaleur du béton donnent de bons résultats, la température maximale mesurée dans les quatre massifs ayant été de $67 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.2. Construction des arcs

Le coffrage, ferrailage et bétonnage des arcs ne sont pas standards et se sont avérés relativement complexes. Cette difficulté est due à la forme parabolique des arcs et les parois du coffrage ont des dimensions variables tant en hauteur qu'en largeur. En plus, la partie supérieure de l'arc est plus large que la partie inférieure de 150 mm, la surface ainsi définie n'est pas verticale et l'angle formé est variable. La partie inférieure des coffrages a été préfabriquée en usine en suivant le profil parabolique, puis assemblée au chantier sur des échafaudages.

Afin de diminuer le coût de l'étalement des arcs, l'entrepreneur a préconisé la mise en place sous les étalements d'un remblai de MG 56. La hauteur des étalements nécessaires a donc été réduite de façon importante, tel que montré sur la figure 7. Selon l'entrepreneur, le délai de réalisation du remblai et des étalements ainsi que le coût de construction ont été ainsi réduits.

Les étalements ont également été conçus et construits pour maintenir en place les plaques d'ancrage des câbles qui pèsent environ 500 kg chacune. Pour ce faire, l'entrepreneur a positionné un étai muni d'une tête ajustable vis-à-vis chaque plaque permettant son ajustement et son maintien en place. Un trou a été pratiqué dans le coffrage afin de bien positionner chacune de ces plaques d'ancrage. Une attention particulière a été portée sur la position de ces plaques afin de s'assurer que les câbles supportant le tablier soient bien positionnés et que les longueurs des câbles correspondent aux valeurs prévues.

La mise en place de l'armature a également demandé des efforts particuliers de la part des ferrailleurs. La zone de travail étant restreinte et la quantité d'armatures à mettre en place étant importante, une coordination a été nécessaire entre les intervenants afin de placer les armatures, les plaques d'attache et les coffrages dans le bon ordre. La forme asymétrique et plus large dans la partie supérieure des arcs a engendré des problèmes aux ferrailleurs; le poids de l'armature étant débalancé, celle-ci avait tendance à basculer de côté. Un support temporaire a donc été ajouté pour retenir l'armature avant la fermeture des coffrages.

Tel que préconisé lors de la construction des massifs, le coffrage des arcs a été réalisé en section de 600 mm avec une doublure de coffrage. Le coffrage en surplomb a également été installé au fur et à mesure du bétonnage jusqu'à ce que la pente du dessus de l'arc soit inférieure à 2 %. La mise en place du béton dans un arc a nécessité environ 12 heures et contient 135 mètres cubes.



Figure 7 - Photos des étalements et coffrage des arcs

Tel que décrit dans la section relative à la conception des arcs, la construction de ceux-ci fut interrompue à leur sommet et une charge horizontale a été appliquée entre les deux demi-arcs afin d'induire un moment à leur base. Cette charge a été appliquée à l'aide de deux vérins, soit un positionné de part et d'autre de l'arc. Ces vérins prenaient appui sur des corbeaux fixés sur chaque extrémité des demi-arcs. La figure 8 présente le montage réalisé pour la mise en charge. Suite à cette mise en charge, des cales ont été mises en place afin de conserver constante l'ouverture entre les demi-arcs, et ainsi la charge, pendant le bétonnage et la cure de la clef. Ces cales ont été enlevées après que le béton de la clef ait atteint 70 % de la résistance spécifiée. Lors de la mise en charge, la déformation de l'arc mesurée a correspondu aux calculs théoriques avec un mouvement horizontal de deux millimètres.



Figure 8. Photos du chargement des arcs

6. 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 suite à une analyse de 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 9 montre une photo d'ensemble du pont avant le bétonnage de la dalle où les modifications proposées sont visibles.



Figure 9 - Vue d'ensemble du pont avant le bétonnage de la dalle

7. 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 des arcs et des unités de fondation. Malgré ces particularités, la construction du pont s'est bien déroulée et les résultats correspondent aux attentes. La fin de la construction du pont et sa mise en service sont prévues pour la fin du mois de juin 2011. Un second article présentera les autres particularités de ce projet, dont la conception et la construction du tablier.

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+).

8. RÉFÉRENCES

M.S. Troitsky, *Planning and Design of Bridges*, John Wiley & Sons, Inc., 1994.

Favre et coll., *La pérennité de l'arc dans la construction*, Revue Ingénieurs et architectes suisses, No. 13, 5 juillet 2000, 13 p.

Nettleton D. A. et Torkelson J.S., *Arch Bridges*, Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, D.C. 20590, 124 p.