CIMA+
Partenaire de génie

Un pont original au Canada

PRIX CANADIENS DU GÉNIE-CONSEIL 2012

Transport

LE PROJET DU PONT EN ARC, À STONEHAM, QUÉBEC

ASSOCIATION OF CONSULTING ENGINEERING COMPANIES | CANADA
ASSOCIATION DES FIRMES D'INGÉNIEURS-CONSEILS | CANADA

CANADIAN CONSULTING engineer

La construction d'un pont de type peu courant au Canada : Un pont en arc

Ce pont est situé dans le secteur Stoneham-et-Tewkesbury au nord de la ville de Québec et fait partie du projet de l'axe routier 73/175 qui comprend la réalisation d'une route à quatre voies et à chaussées séparées sur près de 175 km entre Québec et Saguenay. Ce projet a représenté un défi d'importance pour les ingénieurs de CIMA+. En effet, dès le départ nous avons constaté que le boulevard Talbot croiserait la future autoroute 73 avec un biais fort important de 49 degrés. D'autre part, et selon le tracé proposé, nous avons aussi remarqué que l'autoroute 73 présentait une pente et une courbure appréciables, bien que respectant les normes applicables, à l'endroit où elle allait croiser le boulevard Talbot.

CIMA+ a participé de façon très proactive à la définition de ce pont. L'équipe de concepteurs a regardé l'ensemble du projet en tenant compte de la géométrie de la route, de la sécurité des usagers et des difficultés techniques associées à la construction d'une pile ayant un biais de 49 degrés. Tout au long du projet, différents types de concepts ont été considérés, même des types de ponts peu courants au Canada.

Pour intégrer de façon originale toutes les contraintes, CIMA+ a proposé un concept de pont en arc à tablier inférieur. Celui-ci permettait d'éliminer la construction d'une pile dans le terre-plein central de l'autoroute et d'éviter toute modification aux profils proposés de l'autoroute 73 et du boulevard Talbot en considération de la faible profondeur de ce type de tablier. Ce type de pont est peu commun au Canada. Au Québec, il s'agit seulement du deuxième du genre à être construit sur le réseau routier québécois depuis près de 50 ans, l'autre ayant été érigé à la fin des années 1960 sur l'autoroute 15 dans les Laurentides.

Originalité des solutions

CIMA+ a proposé des solutions originales et audacieuses pour répondre adéquatement aux défis à relever. En tenant compte de l'ensemble des contraintes liées à la topographie du site, nous avons recommandé la construction d'un pont d'étagement en arc à tablier intermédiaire d'une longueur totale de 72 mètres et d'une largeur de 13,4 mètres.

Les concepteurs de CIMA+ ont opté pour deux arcs paraboliques de type funiculaire, soit une forme spécifiquement retenue pour minimiser les efforts de flexion dans les arcs, ceux-ci étant conçus pour travailler plus efficacement lorsqu'ils sont soumis essentiellement à des efforts de compression axiale. La hauteur de chacun des deux arcs par rapport au tablier est d'environ 14 mètres, ou de 20 mètres par rapport au niveau de l'autoroute 73. La section des arcs était variable passant de 800 x 1 200 mm (largeur x hauteur) au sommet à 1 500 x 2 400 mm à leur base. Les deux arcs ont été encastrés à la base dans un massif intégré aux culées. L'ensemble massif-culée prenait appui sur le roc et résistait aux efforts de renversement et de glissement induits par les arcs avec leur poids et par friction respectivement. La largeur hors tout du pont, y compris 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 m.

D'autre part, le tablier du pont est suspendu aux deux arcs à l'aide de 34 câbles d'acier de 48 mm de diamètre. Les câbles ont été fixés à chacun des arcs par des plaques d'ancrage noyées dans le béton. Sur le tablier, les câbles ont été 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, contrairement aux ponts usuels où ce rôle est joué par les poutres longitudinales.

Les concepteurs ont privilégié des arcs monolithiques pour éliminer des rotules susceptibles d'entraîner, comme toute discontinuité dans un élément en béton, une diminution de la durabilité de la structure. Une étude exhaustive des changements volumétriques des arcs, attribuables au retrait et au fluage du béton, ainsi qu'aux variations et gradients thermiques, a été requise afin de vérifier et contrôler leur état de fissuration. Cette étude a mis au jour la nécessité d'appliquer un effort de flexion et de compression à la base des arcs dans le but d'en contrôler l'état de fissuration de la face supérieure. Pour ce faire, une solution originale a été proposée par le concepteur principal de CIMA+. Cette solution consistait à appliquer une charge horizontale au sommet de chacun des arcs en construisant ceux-ci en demi-arcs. La charge appliquée visait alors à induire un effort de flexion et de compression suffisante dans la partie des arcs qui aurait été susceptible de se fissurer sous certains cas de chargement, comme le chargement thermique en période hivernale. Ainsi, il a été 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 a été mis en place afin d'ouvrir l'arc, les deux demi-arcs ont donc été repoussés l'un de l'autre de quelques millimètres avant que l'ouverture de 1,5 mètre ne soit bétonnée.

Soulignons enfin que la géométrie des arcs a été optimisée dans l'intention de minimiser les efforts de flexion induits par les charges et les déformations volumétriques du béton. Cependant, il a été impossible d'éliminer complètement ces efforts de flexion

occasionnés par les charges et les 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, 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'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. D'ailleurs, l'analyse sismique a été faite en considérant l'utilisation du pont en tant que pont de secours.

Les ingrédients du succès

En juin 2011, CIMA+ a livré le pont en arc à tablier inférieur en béton armé qui enjambe la future autoroute 73 dans le respect total de l'échéancier et du budget. Cet ouvrage est actuellement en service et toutes les inspections qu'il a subies depuis son ouverture, dont sa première inspection générale réalisée par le personnel du Ministère en juin 2011, ont permis de conclure que l'ouvrage se comporte selon les attentes des concepteurs.

Il faut noter que ce projet est beaucoup plus complexe qu'il n'apparait en réalité. Pour en assurer la réussite intégrale, CIMA+ a participé de façon proactive à sa réalisation en agissant à titre de surveillant de chantier et y a affecté un représentant de grande expérience. L'anticipation par le surveillant de CIMA+ des problématiques de construction de l'ouvrage, et plus particulièrement des deux arcs de béton, a été au cœur de la réussite de ce projet.

De plus, CIMA+ a accompagné l'entrepreneur à chacune des étapes de la réalisation du projet, et ce, aussi bien à l'usine à béton, pour valider les méthodes employées et la qualité du travail, qu'aux étapes de bétonnage. Une très grande collaboration a été maintenue entre l'équipe de surveillance et celle de l'entrepreneur, le projet étant inhabituel et d'une grande complexité. Cette synergie entre toutes les parties a ainsi assuré au Ministère que le produit livré serait d'une grande qualité, correspondant véritablement à la vision des concepteurs et aux besoins du donneur d'ouvrage.

Dans l'ensemble, ce projet a favorisé la collaboration entre experts, permettant ainsi le transfert de connaissances entre les concepteurs, les architectes et les gens de chantier. De plus, l'expérience du constructeur a été mise à contribution à plusieurs occasions. Enfin, ce sont toutes les entreprises réunies autour de l'équipe CIMA+ qui ont bénéficié de l'expérience acquise. La firme est donc fortement convaincue que l'image de la profession auprès du public canadien s'en trouve améliorée, et cela renforce d'autant plus la volonté de cultiver l'excellence au sein de notre entreprise.

CIMA+ avait à relever dans ce projet plusieurs défis d'ingénierie et de construction. Nous pensons que la meilleure façon d'y arriver était de préserver au plus haut point l'intérêt et la motivation de toutes les personnes associées au projet de ce pont en arc. Nous sommes fortement convaincus d'avoir livré à notre client la meilleure solution. C'était une autre occasion pour le génie canadien de démontrer ses standards d'excellence.

TABLE DES MATIÈRES

1. PARTICULARITÉS DU PROJET ET ORIGINALITÉ DES SOLUTIONS 2
1.1 MISE EN CONTEXTE 2
1.2 LA SOLUTION RETENUE 4
1.3 ORIGINALITÉ DES SOLUTIONS 6
1.4 CE PROJET A ÉTÉ UNE OCCASION D'APPRENTISSAGE EXCEPTIONNEL 7

2. COMPLEXITÉ 8
2.1 CONCEPTION D'UN PONT TRÈS PEU COURANT AU CANADA 8
2.2 UNE RÉALISATION TRÈS COMPLEXE 9

3. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT 12

4. RETOMBÉES SOCIALES ET ÉCONOMIQUES 12

5. SATISFACTION OU DÉPASSEMENT DES BESOINS DU CLIENT 14
5.1 RESPECT DU BUDGET ET DE L'ÉCHÉANCIER 14
5.2 LES INGRÉDIENTS DU SUCCÈS 16

1. PARTICULARITÉS DU PROJET ET ORIGINALITÉ DES SOLUTIONS

1.1 MISE EN CONTEXTE

La construction du pont en arc situé dans le secteur Stoneham-et-Tewkesbury fait partie du projet de l'axe routier 73/175 qui comprend la réalisation d'une route à quatre voies et à chaussées séparées sur près de 175 km entre Québec et Saguenay. Ce projet vise essentiellement à favoriser les déplacements sécuritaires des usagers par la réduction des risques d'accident en plus de contribuer de façon importante à l'essor économique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

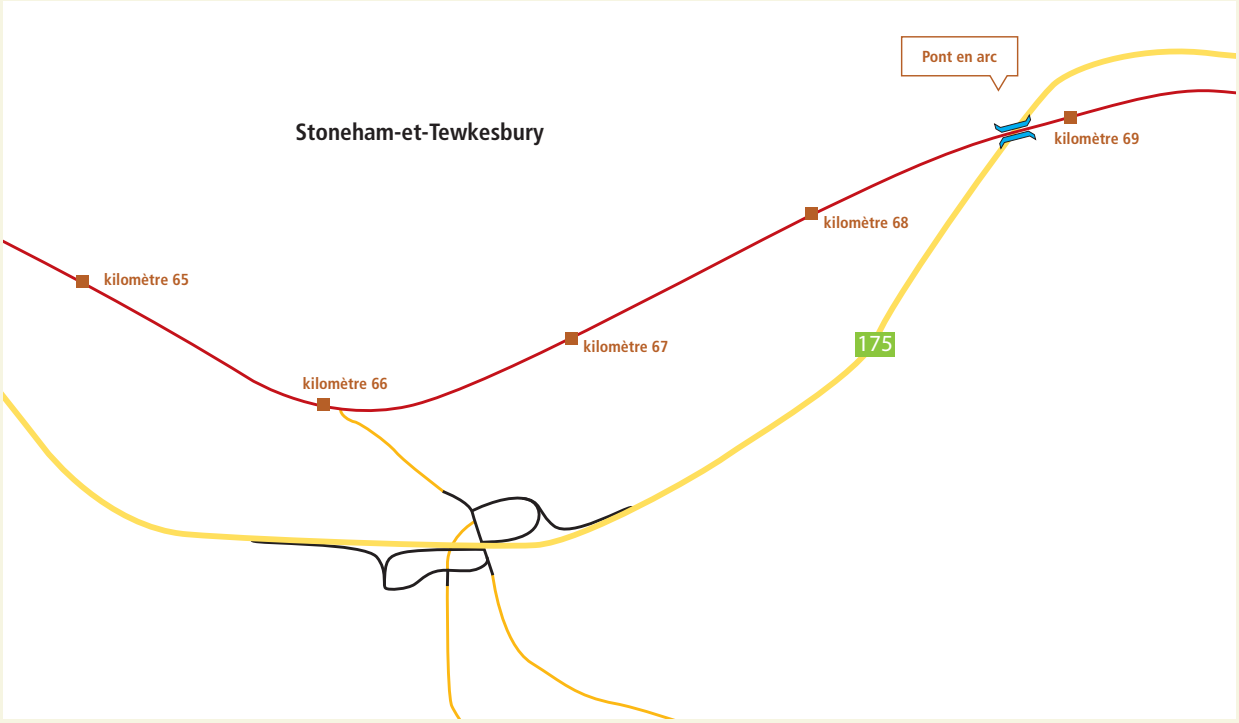
Compte tenu de l'ampleur du projet à réaliser, le travail de conception de la route et des structures a été divisé en différents lots par le ministère des Transports (MTQ). En 2003, le MTQ lançait une première série d'appels d'offres publics pour la réalisation de mandats de services professionnels qui visaient, entre autres, à préparer les plans et les devis pour les travaux de prolongement de l'autoroute 73 sur un tronçon se situant entre les kilomètres 60 à 94.

C'est en réponse aux appels d'offres publics pour la réalisation de mandats de services professionnels que CIMA+ a préparé et a soumis au MTQ un cahier de candidature de première qualité présentant l'expérience en ponts de la firme, de même que les compétences du chargé de projet et l'expertise de l'équipe sélectionnée pour mener à bien les mandats proposés. Le cahier de candidature présenté a alors permis à CIMA+ de se classer premier dans la série de mandats octroyés par le Ministère.

CIMA+ a réussi à obtenir un tel classement grâce à la grande qualité de sa proposition ainsi qu'au mode de sélection de la firme par le Ministère, qui n'était pas basé sur un prix (offre « sans prix »), mais plutôt sur l'expertise de la firme et la qualité de ses ressources. Ce mandat de services professionnels allait donc nous permettre de relever un défi important et intéressant. Nous avions ainsi l'occasion de réaliser une étude d'avant-projet (élaboration de concepts), de confectionner les plans et les devis, en plus d'assurer la surveillance des travaux de construction du pont dont il question dans le présent dossier.

> Le cahier de candidature présenté a alors permis à CIMA+ de se classer premier dans la série de mandats octroyés par le Ministère.

Le mandat confié à CIMA+ visait d'abord à identifier et à analyser le type de structure. En étudiant le tracé établi par le Ministère, l'équipe de CIMA+ a constaté que le boulevard Talbot croiserait la future autoroute 73 avec un biais fort important de 49 degrés. D'autre part, et selon le tracé proposé, CIMA+ a aussi remarqué que l'autoroute 73 présentait une pente et une courbure appréciables, bien que respectant les normes applicables, à l'endroit où elle allait croiser le boulevard Talbot.



Par conséquent, afin de respecter les contraintes de dégagement horizontal imposées pour assurer le respect des distances de visibilité aux usagers, il est apparu que le pont à construire devrait avoir une portée appréciable de près de 70 mètres. Par ailleurs, la géométrie du site imposait que la future autoroute 73 soit encavée dans le roc. CIMA+ a alors fait une importante constatation, soit que l'épaisseur du tablier du pont projeté devait être limitée en vue de minimiser les quantités de roc à excaver, sans quoi le profil du boulevard Talbot, ou celui de la future autoroute 73, établi par le Ministère aurait dû être modifié. Cependant, les coûts associés à ces modifications de profil ont été jugés trop importants pour que ces solutions soient retenues.

Pour des raisons économiques, le premier concept de structure considéré par CIMA+ a été celui d'un pont conventionnel de type « dalle sur poutres » avec une pile située dans le terre-plein séparant les deux voies de l'autoroute projetée. Notons qu'en raison du biais fort important de 49 degrés et de la courbure appréciable de l'autoroute 73 à l'endroit où elle croise le boulevard Talbot, la pile située dans le terre-plein aurait nécessité la construction de près de 600 mètres de barrière en béton (New Jersey) le long de la voie nord pour protéger les usagers en cas de dérapage vers cette pile. Cela représentait un coût non négligeable dans le projet. De plus, la construction d'un tablier appuyé sur une pile ayant un biais de 49 degrés présentait des difficultés techniques importantes. L'ensemble de ces contraintes a alors amené les concepteurs de CIMA+ à analyser d'autres concepts de structure.

Bien que rejetée rapidement par CIMA+, la solution visant à construire un pont d'étagement de type « dalle sur poutres » sans pile dans le terre-plein avait aussi été considérée. En effet, ce concept de structure aurait été imposant et coûteux. Il aurait signifié des poutres très épaisses qui auraient eu pour effet d'entraîner un abaissement du profil de l'autoroute 73 ou un rehaussement de celui du boulevard Talbot de sorte que le dégagement vertical sous le pont projeté respecte les normes applicables. Dans l'un ou l'autre de ces cas, des travaux de terrassement de grande envergure auraient été requis, ce qui aurait été couteux et risquerait d'occasionner un retard dans l'échéancier du projet.

1.2 LA SOLUTION RETENUE

L'équipe de CIMA+ était convaincue qu'il était possible d'éliminer la pile dans le terre-plein tout en minimisant l'épaisseur du tablier pour respecter le dégagement vertical sous le pont. Nous savions aussi que ce pont deviendrait la porte d'entrée de la région de Québec à partir du Saguenay et cela en ferait sûrement un ouvrage d'art d'importance dans la région.

C'est dans cet esprit que CIMA+ a proposé au Ministère de faire appel à un architecte pour assurer l'esthétisme de l'ouvrage. Ce dernier agissait en qualité de conseiller pour aider le chargé de projet à établir les formes à donner aux constituants du pont et, le cas échéant, à statuer sur l'ajout d'éléments. Au cours de cette partie du projet, une réunion de remue-méninges en présence de tous les experts de l'équipe a été organisée afin de trouver une solution pour éliminer la pile, composer avec la topographie du site, améliorer la sécurité des usagers et assurer l'esthétisme de l'ouvrage. L'objectif de cette rencontre était de créer une synergie créatrice et elle a donné les résultats escomptés. Une solution technique originale, à la fois économiquement avantageuse et visuellement esthétique, a alors été proposée par CIMA+, soit un concept de pont en arc.

Une fois le concept proposé, des visites sur les lieux ont été organisées avec les experts de l'équipe pour en vérifier la pertinence sur le terrain. Il a alors été constaté d'emblée que les conditions du site étaient propices à la construction d'un pont en arc, puisqu'à cet endroit le roc n'était pas très profond et de bonne qualité. Le représentant du Ministère était ouvert au concept de CIMA+ et il a alors été établi par tous que le concept proposé était idéal pour répondre aux différentes contraintes identifiées.

Pour intégrer de façon originale toutes les contraintes, CIMA+ a alors proposé un concept de pont en arc à tablier inférieur. Ce type de pont permettait d'éliminer la construction d'une pile dans le terre-plein central de l'autoroute et d'éviter toute modification aux profils proposés de l'autoroute 73 et du boulevard Talbot en considération de la faible profondeur de ce type de tablier. De plus, la suppression de la pile permettait :

- l'élimination des contraintes relatives au biais imposé par la pile;
- l'élimination de 600 mètres de « New Jersey » le long de la voie nord qui auraient été requis pour protéger les usagers en cas de dérapage vers la pile;
- l'augmentation de la sécurité des usagers, l'élimination de la pile et des New Jersey les protégeant, sont des obstacles supprimés en bordure de la route présentant un danger aux usagers de la route;
- la construction d'un tablier de pont mince de moins de 1000 mm d'épaisseur.

Un pont en arc à tablier inférieur est peu commun au Canada. Au Québec, il s'agit seulement du deuxième du genre à être construit sur le réseau routier québécois depuis près de 50 ans, l'autre ayant été érigé à la fin des années 1960 sur l'autoroute 15 dans les Laurentides.

Mentionnons que trois modifications et ajouts proposés par l'architecte ont été retenus par les concepteurs et le Ministère à la suite de l'analyse des coûts et de la vérification des incidences de ceux-ci sur la durabilité et l'entretien de l'ouvrage. Le mur de front des culées a été incliné du fait que le sommet était en retrait par rapport à la base. CIMA+ a aussi modifié la surface supérieure des arcs en l'élargissant de 150 mm. La face extérieure des arcs allait ainsi être inclinée. Finalement, une plaque de couleur contrastante a été ajoutée à l'extrémité des porte-à-faux du tablier.

CIMA+ a participé de façon extrêmement proactive à la définition du projet. L'équipe de concepteurs a regardé l'ensemble du projet en tenant compte de la géométrie de la route, de la sécurité des usagers et des difficultés techniques associées à la construction d'une pile ayant un biais de 49 degrés. Tout au long du projet, différents types de concepts ont été considérés, même des types de ponts peu courants au Canada. Nous avons conseillé la direction territoriale de la Capitale-Nationale dans sa démarche pour faire accepter le concept par les hautes instances du Ministère. Nous avons aussi fait plusieurs recherches bibliographiques sur ce qui se faisait au plan international.

L'équipe de CIMA+ a démontré son leadership, sa proactivité et son sens de l'organisation de manière indéniable en faisant preuve d'une audace notable au fil de la conception

La firme CIMA+ a adopté une approche de conception intégrée en proposant au Ministère la construction d'un pont en arc, plus coûteux à réaliser qu'un pont conventionnel, mais plus économique dans son ensemble si l'on considère que la construction d'un pont conventionnel aurait nécessité des coûts plus importants en voirie. D'ailleurs, CIMA+ a accordé une grande importance à la durabilité et à l'analyse du cycle de vie de l'ouvrage. Notons également qu'une analyse tridimensionnelle de la structure a été faite à l'aide du logiciel *Visual Design*, ce qui a permis d'optimiser la conception de tous les éléments de la structure.

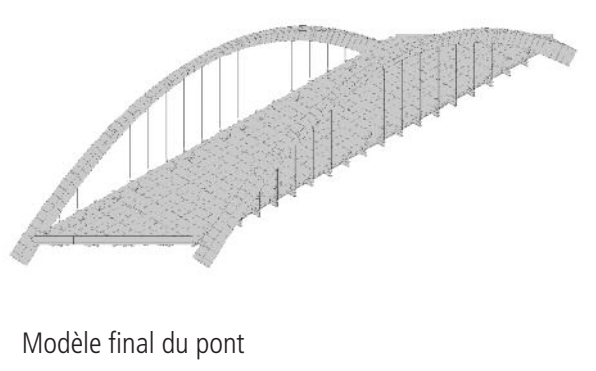
L'équipe de CIMA+ a démontré son leadership, sa proactivité et son sens de l'organisation de manière indéniable en faisant preuve d'une audace notable au fil de la conception en collaborant de façon étroite avec les autres professionnels pour favoriser l'échange d'information et en intégrant cette information adéquatement au projet au cours de sa réalisation. Nous sommes convaincus que les ingénieurs de CIMA+ ont conçu un pont entièrement adapté à la situation géographique et aux exigences de sécurité imposées par le tracé proposé de la future autoroute 73.

1.3 ORIGINALITÉ DES SOLUTIONS

CIMA+ a proposé des solutions originales et audacieuses pour répondre adéquatement aux défis à relever. En tenant compte de l'ensemble des contraintes liées à la topographie du site, CIMA+ a recommandé la construction d'un pont d'étagement en arc à tablier intermédiaire d'une longueur totale de 72 mètres et d'une largeur de 13,4 mètres.

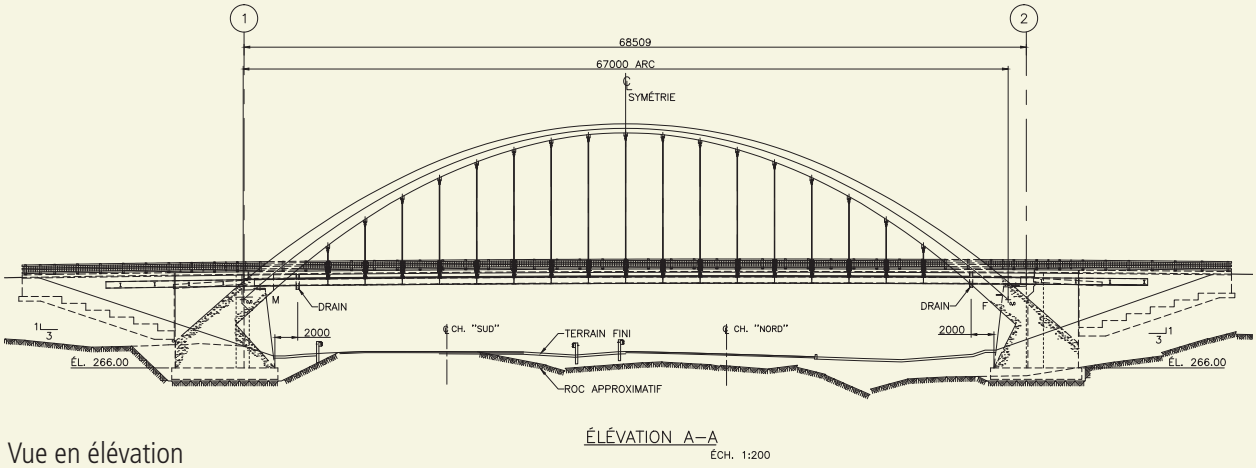
Les concepteurs de CIMA+ ont opté pour deux arcs paraboliques de type funiculaire, soit une forme spécifiquement retenue pour minimiser les efforts de flexion dans les arcs, ceux-ci étant conçus pour travailler plus efficacement lorsqu'ils sont soumis essentiellement à des efforts de compression axiale. La hauteur de chacun des deux arcs par rapport au tablier est d'environ 14 mètres, ou de 20 mètres par rapport au niveau de l'autoroute 73. La section des arcs était variable passant de 800 x 1 200 mm (largeur x hauteur) au sommet à 1 500 x 2 400 mm à leur base. Les deux arcs ont été encastrés à la base dans un massif intégré aux culées. L'ensemble massif-culée prenait appui sur le roc et résistait aux efforts de renversement et de glissement induits par les arcs avec leur poids et par friction respectivement. La largeur hors tout du pont, y compris 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 m. D'autre part, le tablier du pont est suspendu aux deux arcs à l'aide de 34 câbles d'acier de 48 mm de diamètre. Les câbles ont été fixés à chacun des arcs par des plaques d'ancrage noyées dans le béton. Sur le tablier, les câbles ont été 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, contrairement aux ponts usuels où ce rôle est joué par les poutres longitudinales.

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*. Il est à noter que pour simuler le comportement (déformation et efforts) dans les arcs, les étapes de construction ont été recréées à l'aide de différents modèles, soit la construction des demi-arcs, 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 de séparer les charges et les déformations imposées des différentes parties de l'ouvrage en fonction de l'avancement des travaux. Ainsi, les déformations notées à chaque étape de construction sont intégrées dans le modèle suivant de manière à obtenir une simulation la plus près de la réalité et ainsi, cerner les sources de tout effort parasite.



Modèle final du pont

Les concepteurs ont privilégié des arcs monolithiques pour éliminer des rotules susceptibles d'entraîner, comme toute discontinuité dans un élément en béton, une diminution de la durabilité de la structure. Une étude exhaustive des changements volumétriques des arcs, attribuables au retrait et au fluage du béton, ainsi qu'aux variations et gradients thermiques, a été requise afin de vérifier et contrôler leur état de fissuration. Cette étude a mis au jour la nécessité d'appliquer un effort de flexion et de compression à la base des arcs dans le but d'en contrôler l'état de fissuration de la face supérieure. Pour ce faire, une solution originale a été proposée par le concepteur principal de CIMA+. Cette solution consistait à appliquer une charge horizontale au sommet de chacun des arcs en construisant ceux-ci en demi-arcs. La charge



Vue en élévation

appliquée visait alors à induire un effort de flexion et de compression suffisante dans la partie des arcs qui aurait été susceptible de se fissurer sous certains cas de chargement, comme le chargement thermique en période hivernale. Ainsi, il a été 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 a été mis en place afin d'ouvrir l'arc, les deux demi-arcs ont donc été repoussés l'un de l'autre de quelques millimètres avant que l'ouverture de 1,5 mètre ne soit bétonnée.

Soulignons enfin que la géométrie des arcs a été optimisée dans l'intention de minimiser les efforts de flexion induits par les charges et les déformations volumétriques du béton. Cependant, il a été impossible d'éliminer complètement ces efforts de flexion occasionnés par les charges et les 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, 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'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. D'ailleurs, l'analyse sismique a été faite en considérant l'utilisation du pont en tant que pont de secours.

1.4 CE PROJET A ÉTÉ UNE OCCASION D'APPRENTISSAGE EXCEPTIONNEL

Ce projet unique conçu par CIMA+ a entraîné plusieurs retombées pour la profession. À titre d'exemple, ce pont en arc a fait la page couverture de l'édition 2011 du Cahier des charges et des devis généraux (CCDG) du ministère des Transports du Québec. Mentionnons d'ailleurs que ce projet a été un défi d'ingénierie tant sur le plan de la conception que de la construction de l'ouvrage. Ce type de pont est inusuel et des articles techniques traitant des particularités de sa conception et de sa construction ont été présentés en 2011 par les ingénieurs de CIMA+. En fait, à ce jour, deux articles techniques ont été préparés, l'un pour l'*American Concrete Institute* (Boucherville 2011) et l'autre pour le Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art du MTQ (Québec 2011).

Ce projet a fait la démonstration du savoir-faire canadien et a permis la collaboration entre des ingénieurs et des architectes. La réalisation d'un tel ouvrage a aussi demandé une excellente collaboration entre les divers intervenants du projet, qu'il s'agisse de l'entrepreneur général, Entreprise Alfred Boivin, qui a coordonné les travaux, de Coffrage Provincial qui a réalisé les coffrages et la mise en place du béton, de ABF qui a fourni et installé l'armature, de LVM, le laboratoire de contrôle des matériaux, au ministère des Transports ainsi que l'équipe de surveillance des travaux de CIMA+.

En fait, ce projet aura été une occasion d'apprentissage exceptionnelle et il a apporté son lot de nouvelles connaissances. De plus, il s'agit d'une excellente visibilité pour la profession, car c'est un ouvrage non standard dont CIMA+ est très fière.

Dans l'ensemble, ce projet a favorisé la collaboration entre experts, permettant ainsi le transfert de connaissances entre les concepteurs, les architectes et les gens de chantier. De plus, l'expérience du constructeur a été mise à contribution à plusieurs occasions. Enfin, ce sont toutes les entreprises réunies autour de l'équipe CIMA+ qui ont bénéficié de l'expérience acquise. La firme est donc fortement convaincue que l'image de la profession auprès du public québécois s'en trouve améliorée, et cela renforce d'autant plus la volonté de cultiver l'excellence au sein de l'entreprise.

2. COMPLEXITÉ

2.1 CONCEPTION D'UN PONT TRÈS PEU COURANT AU QUÉBEC

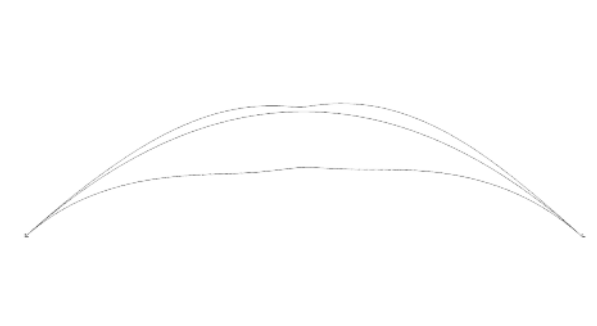
Conception des arcs

CIMA+ a étudié en détail différents types de ponts en arc afin de proposer la meilleure solution. Ces ponts sont regroupés en trois types selon la position du tablier par rapport à l'arc, soit : à tabliers supérieur, inférieur et intermédiaire. Pour le pont du boulevard Talbot, des considérations topographiques et un dégagement vertical minimal à respecter sous celui-ci imposaient l'emploi d'un arc à tablier inférieur.

Dans ce cas, 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 reposait donc sur des considérations économiques. CIMA+ a retenu l'emploi d'arc en béton armé parce qu'il était plus économique.

CIMA+ a retenu l'emploi d'arc en béton armé parce qu'il était plus économique.

Enveloppe à l'ultime des moments sur un arc



Enveloppe à l'ultime des déformations sur arc

Toutefois, comme le béton armé est plus lourd que l'acier, les arcs ont dû être conçus pour résister à des charges sismiques plus importantes, celles-ci étant proportionnelles au poids des éléments soumis au séisme. De plus, comme il n'était pas question de considérer un endommagement des arcs à la suite d'un tremblement de terre, chacun des deux arcs a été conçu pour demeurer élastique (aucune formation de rotule plastique) sous le séisme de conception imposé par la norme canadienne des ponts routiers. En imposant un comportement élastique aux arcs en cas de séisme, les concepteurs de CIMA+ ont dû positionner avec soin de grandes quantités d'armatures dans les arcs, et ce, tant pour résister aux efforts de flexion qu'au cisaillement induit par un éventuel séisme.

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 celles-ci qui permet l'encastrement et le support des arcs. Les massifs sont joints et solidaires au mur de front de sorte que l'ensemble massif-culée travaille de façon monolithique, alors que les unités de 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.

Il faut noter que la conception des éléments de fondation, et plus particulièrement de celle servant à retenir le tablier en cas de séisme (culée nord), a été une étape fort complexe du projet qui a exigé beaucoup de temps et d'énergie à l'équipe de concepteurs de CIMA+. En fait, l'ancrage de la masse importante du tablier, découlant essentiellement de ses 70 mètres de longueur, à la culée nord (unité de fondation fixe) a demandé le développement de butoirs spéciaux en acier. Ceux-ci ont permis de maintenir le tablier en place tant transversalement que longitudinalement en cas de séisme. Les efforts transmis par le tablier à cette culée, par l'entremise des buttoirs en acier, ont aussi dû faire l'objet d'une analyse pour s'assurer que cette culée ne renverserait pas lors d'un tremblement de terre. Les efforts à considérer en pareil cas étaient très importants, puisque le Ministère exigeait que le pont projeté soit un « pont de secours » au sens de la norme canadienne de calcul des ponts routiers, soit un pont devant rester ouvert à toute circulation après un séisme d'importance.

Conception du tablier

La conception du tablier de ce pont est différente d'un tablier standard principalement parce que les poutres principales du tablier sont perpendiculaires à l'axe de la route et qu'elles sont retenues par des câbles. Le point particulier de cette conception repose sur le comportement de l'ensemble du tablier sous le passage d'un camion. En fait, les déformations entre chacune des poutres principales sous le passage d'un camion sont importantes à prendre en considération afin que la dalle ne fissure pas et soit durable. CIMA+ a porté une attention particulière lors de la conception du tablier dans le but de limiter les déformations entre deux poutres adjacentes et les vibrations. Notons par ailleurs que pour réduire les vibrations, l'équipe de concepteur a décidé de mettre en place une dalle relativement épaisse afin d'augmenter l'inertie du tablier et, par conséquent, le confort des usagers lors de leur passage sur l'ouvrage.

La déformation des câbles et de l'arc joue également un rôle important dans le comportement du tablier puisqu'aucun des câbles ne possède la même longueur, et leur élongation sous une même charge était différente. L'élongation des câbles et le mouvement de l'arc ont donc été évalués en conséquence et inclus dans l'analyse du comportement du tablier. La déformation des câbles et de l'arc sous le poids de la dalle, de l'enrobé bitumineux et des chasse-roues a donc été déterminée en vue d'ajuster l'élévation de la structure d'acier pour que le profil final du pavage soit réalisé comme prévu.

Comme le tablier est retenu par des câbles, il y a très peu de charges sur les appareils d'appui comparativement à celles que l'on retrouve habituellement sur un pont conventionnel. De plus, la présence d'un tablier ayant un fort biais entraîne des efforts moindres dans les coins aigus. CIMA+ a donc dû tenir compte du possible soulèvement du tablier aux appuis sous certaines conditions de chargement. Les appareils d'appui ont alors été conçus en conséquence.

2.2 UNE RÉALISATION TRÈS COMPLEXE

Construction des unités de fondation

La construction des unités de fondation a commencé 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 massif-culée. Le coffrage de cet ensemble a ensuite été réalisé de façon monolithique. La construction de ces coffrages a été particulièrement 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.

Par ailleurs, le volume de béton entrant dans la construction de l'ensemble massif-culée d'une unité de fondation était d'environ 450 m3. Le bétonnage de cet élément constituait donc une coulée d'importance qui a pris près de 12 heures à réaliser. Cette quantité importante de béton a donc imposé le contrôle de sa température afin d'assurer une bonne durabilité au matériau. L'équipe de surveillance de CIMA+ était bien au fait qu'une température trop élevée du béton pouvait créer des problématiques de durabilité de l'ouvrage. C'est sans compter que le bétonnage des éléments de fondation a été effectué dans une période exceptionnellement chaude de l'été 2010.

Photos des étaiements et coffrage des arcs

Construction des arcs

Le coffrage, le ferraillage et le bétonnage des arcs ne sont pas standards et se sont avérés relativement complexes à exécuter. Ces difficultés étaient dues à la forme parabolique des arcs et des parois du coffrage qui avait des dimensions variables tant en hauteur qu'en largeur. En outre, la partie supérieure de l'arc était plus large que la partie inférieure de 150 mm, la surface ainsi définie n'était pas verticale et l'angle formé était variable. La partie inférieure des coffrages a été préfabriquée en usine en suivant le profil parabolique, puis assemblée au chantier sur des échafaudages.

La mise en place de l'armature a également demandé des efforts particuliers de la part des ferrailleurs. La zone de travail était restreinte et la quantité d'armatures à mettre en place était 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 de la partie supérieure des arcs a engendré des problèmes aux ferrailleurs : le poids de l'armature étant instable, celle-ci avait tendance à basculer d'un côté.

Construction du tablier

La construction du tablier était elle aussi non standard, car les poutres principales étaient perpendiculaires à l'axe de la route et qu'elles étaient retenues par des câbles. Lors de la mise en place de ces poutres, une attention particulière a été portée sur l'ajustement de l'élévation de chacune des extrémités de poutres de façon que le profil final de la route corresponde bien à ce qui avait été établi dans les plans et devis.

À la suite de l'installation et de l'ajustement de la structure d'acier, la construction du coffrage de la dalle a été amorcée. L'ajustement de l'élévation du coffrage était également un aspect particulier du fait que la déformation du tablier était différente de celle d'un pont conventionnel. En fait, l'ajustement du coffrage de la dalle s'est effectué sur chacune des poutres principales, transversales à l'axe de la route. Le principal défi de ce travail d'ajustement consistait à tenir compte des déformations anticipées provenant de l'élongation des câbles et de la déformation des arcs et des poutres.

3. IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

Des bétons à haute performance ont été utilisés pour augmenter la durabilité de tous les éléments structuraux. Notons que tous ces bétons contenaient des ajouts cimentaires (cendres volantes, laitiers de haut-fourneau) qui sont des résidus de procédés industriels. La décision d'utiliser ces types de liants permet de réduire de 30 % les GES lors de la fabrication du ciment. Le béton ternaire est par ailleurs un béton très résistant à la pénétration des sels de déglaçage, il a une grande durabilité et possède une perméabilité beaucoup plus faible aux agressions chimiques externes que les bétons simplement constitués de ciment Portland.

CIMA+ a fait plusieurs interventions au plan environnemental dans ce projet. Retenons, entre autres :

- La réduction de l'excavation du roc permettant de minimiser l'empreinte environnementale.
- L'utilisation d'une membrane d'étanchéité sur la dalle pour en augmenter la durabilité.
- La conception qui assure une durée de vie de 75 ans avec un entretien minimal. À l'exception du tablier (dalle, membrane et enrobé bitumineux) qui est exposé aux pires conditions (sels de déglaçage) et qui risque de devoir faire l'objet d'un entretien tous les 20 ou 25 ans, tous les autres éléments du pont ne nécessiteront aucun entretien durant toute la vie utile de l'ouvrage.

4. RETOMBÉES SOCIALES ET ÉCONOMIQUES

Il est important de souligner que pour les 300 000 personnes habitant la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean, l'axe routier 73/175 constitue le principal lien avec la région de la Capitale-Nationale et le réseau autoroutier québécois. Au fil des ans, l'amélioration de cette route est devenue une nécessité pour les résidents, les touristes et les entreprises de la région.

Le réaménagement de l'axe routier 73/175 entrepris dans les années 2000 est un projet d'envergure qui nécessite la construction de 174 km de route, un contexte géographique complexe, un milieu environnemental dense et des contraintes techniques imposantes. Sur les 174 km de route à construire, 102 sont maintenant mis en service.

Ce projet réalisé par le MTQ est l'un des plus importants de son histoire et représente un investissement d'environ un milliard de dollars.

Ce projet réalisé par le MTQ est l'un des plus importants de son histoire et représente un investissement d'environ un milliard de dollars. Selon le MTQ, cette réalisation favorisera les déplacements sécuritaires par la réduction des risques d'accident en face à face et avec la grande faune. En outre, elle permettra d'assurer la fluidité du trafic et de faire face à l'augmentation prévue de la circulation, en plus de contribuer à l'essor économique de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean et de l'ensemble du Québec. À lui seul, ce projet contribuera au maintien ou à la création de plus de 1 300 emplois directs par année.

Le ministère des Transports du Québec souligne également que : « l'amélioration de la sécurité routière et la réduction du temps de déplacement sont des avantages directs qui découleront de la réalisation du projet. Mais, le principal enjeu du projet est plutôt de créer des conditions avantageuses pour favoriser un développement socio-économique soutenu de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean en dotant la région d'une route adéquate pour relier l'un des six principaux centres urbains du Québec, soit Ville de Saguenay. La construction d'une infrastructure de transport majeure en région se solde toujours par un effet structurant sur le développement socio-économique du territoire desservi. »

5. SATISFACTION OU DÉPASSEMENT DES BESOINS DU CLIENT

En juin 2011, CIMA+ a livré le pont en arc à tablier inférieur en béton armé qui enjambe la future autoroute 73 dans le respect total de l'échéancier et du budget. Cet ouvrage est actuellement en service et toutes les inspections qu'il a subies depuis son ouverture, dont sa première inspection générale réalisée par le personnel du Ministère en juin 2011, ont permis de conclure que l'ouvrage se comporte selon les attentes des concepteurs. Entre autres, mentionnons que les vibrations sous le passage des camions lourdement chargés sont faibles et qu'il y a peu de fissuration observable, même à la base des arcs; un endroit sensible où les efforts de flexion peuvent être appréciables par moment.

CIMA+ a développé un concept qui a pu être optimisé sur l'ensemble du projet

Soulignons aussi que l'ouvrage a été conçu par CIMA+ de manière à ce que sa fonctionnalité soit maintenue dans le cas où un accident aurait lieu sur le pont provoquant la rupture de l'un des câbles servant à supporter le tablier. Lors d'un pareil événement, le Ministère 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, la circulation des charges lourdes sur le pont devrait alors être interdite le temps de réaliser les réparations requises.

Enfin, il faut mentionner que la géométrie du tablier (nombre de voies sur le pont) permet de répondre aux besoins du Ministère en donnant aux usagers toute la fluidité nécessaire. Les usagers disposent également de larges accotements, ce qui augmente de façon importante leur sécurité en cas de besoin.

5.1 RESPECT DU BUDGET ET DE L'ÉCHÉANCIER

CIMA+ et ses ingénieurs ont construit un pont en arc dont le coût a été plus élevé qu'un pont conventionnel. En fait, le pont conçu a coûté près de 4 500 $ le mètre carré par rapport à un coût typique de 4 000 $ le mètre carré pour un pont d'étagement conventionnel. Cependant, sur la globalité du projet, des économies appréciables ont été réalisées étant donné la faible épaisseur du tablier du pont en arc. Ce facteur a permis d'éviter une augmentation considérable des quantités de roc à excaver pour respecter le dégagement vertical sous la structure conformément aux normes applicables. En effet, l'épaisseur du tablier du pont en arc est de moins de 1,0 mètre comparativement à une épaisseur qui aurait pu atteindre plus de 2,5 mètres dans le cas où un pont conventionnel sans pile (de type « dalle sur poutres ») aurait été retenu. De plus, le concept de pont en arc a aussi permis d'éviter la construction de près de 600 mètres de « New Jersey » qui aurait été nécessaire dans le cas d'un pont conventionnel avec pile dans le terre-plein.

CIMA+ a développé un concept qui a pu être optimisé sur l'ensemble du projet, incluant les imprévus en cours de chantier, pour un coût d'environ 20 % inférieur à celui estimé lors de la phase de confection des plans et devis. En résumé, les coûts ont été les suivants :

- Le prix soumissionné par l'entrepreneur : 4 413 000 $
- L'estimation des travaux par CIMA+ : 6 100 000 $
- Le coût final du projet : 4 404 246 $

L'équipe CIMA+ a respecté l'échéancier global de construction de ce tronçon, incluant le pont et la route. Il faut cependant souligner que la construction du pont a dépassé l'échéancier initial prévu de 38 semaines, car le client et les concepteurs ont décidé de reporter la fin de la construction afin de bénéficier de conditions climatiques plus favorables. En prévision d'assurer la durabilité de l'ouvrage, le bétonnage de la dalle a été reporté par le surveillant au printemps plutôt que tard à l'automne par temps froid. Ce report n'a eu aucun impact sur l'échéancier global du contrat, puisque l'autoroute 73 passant sous le pont en arc ne devait être ouverte à la circulation que bien après la fin du chantier.

CIMA+ a eu un souci d'économie dans la réalisation de ce projet. C'est dans un tel souci que les ingénieurs de la firme ont conçu des arcs sans rotules, soit des arcs monolithiques et continus d'une culée à l'autre. Ce choix a été fait dans l'intention de réduire les coûts d'entretien de la structure et d'en assurer une durabilité accrue. De plus, de l'acier d'armature galvanisé pour tous les éléments exposés aux sels a aussi été utilisé en vue d'augmenter de façon très importante, et à très faibles coûts, la durée de vie de la structure. Cette décision était d'ailleurs particulièrement importante dans le cas des arcs où les interventions futures (travaux de réparation) pourraient être complexes à réaliser en raison de la nature des éléments liés au support du tablier.

5.2 LES INGRÉDIENTS DU SUCCÈS

Ce projet est beaucoup plus complexe qu'il n'apparait en réalité. Pour en assurer la réussite intégrale, CIMA+ a participé de façon proactive à sa réalisation en agissant à titre de surveillant de chantier et y a affecté un représentant de grande expérience. L'anticipation par le surveillant de CIMA+ des problématiques de construction de l'ouvrage, et plus particulièrement des deux arcs de béton, a été au cœur de la réussite de ce projet. Le surveillant de CIMA+ a également eu à valider toutes les méthodes de travail de l'entrepreneur plusieurs semaines avant leurs mises en œuvre et à prendre de nombreuses décisions au chantier de façon rapide et efficace.

De plus, CIMA+ a accompagné l'entrepreneur à chacune des étapes de la réalisation du projet, et ce, aussi bien à l'usine à béton, pour valider les méthodes employées et la qualité du travail, qu'aux étapes de bétonnage. Une très grande collaboration a été maintenue entre l'équipe de surveillance et celle de l'entrepreneur, le projet étant inhabituel et d'une grande complexité. Cette synergie entre toutes les parties a ainsi assuré au Ministère que le produit livré serait d'une grande qualité, correspondant véritablement à la vision des concepteurs et aux besoins du donneur d'ouvrage.

CIMA+ assurait une présence continuelle du surveillant sur le site pour que tous les détails respectent les attentes du client et que les produits livrés soient de première qualité. Ces éléments ont été exécutés selon les normes du Ministère. Mentionnons enfin qu'une énergie et des efforts considérables ont été déployés par CIMA+ pour soutenir l'entrepreneur, pour informer le représentant du Ministère et pour assurer la réalisation du concept dans son essence même, et ce, tout en respectant le budget et l'échéancier.

La firme CIMA+ avait à relever dans ce projet plusieurs défis d'ingénierie et de construction.

La firme CIMA+ avait à relever dans ce projet plusieurs défis d'ingénierie et de construction. Nous pensons que la meilleure façon d'y arriver était de préserver au plus haut point l'intérêt et la motivation de toutes les personnes associées au projet de ce pont en arc. Nous sommes fortement convaincus d'avoir livré à notre client la meilleure solution. C'était une autre occasion pour le génie canadien de démontrer ses standards d'excellence.

CIMA+
Partenaire de génie

www.cima.ca

EMPLOYEURS DE CHOIX AU CANADA 2012

AU CANADA SOCIÉTÉS LES MIEUX GÉRÉES MEMBRE PLATINE