

PROJET DE CONSTRUCTION D'UN PONT D'UNE DURÉE DE SERVICE ANTICIPÉE DE 150 ANS

Sylvain Goulet, ing.
Direction des structures
Service de la conception

RÉSUMÉ

Au cours de l'été 2004, un pont innovant a été construit sur l'autoroute 20 au-dessus de la rivière Henri dans la municipalité de Val-Alain.

L'objectif initialement établi pour ce projet, en termes de durabilité du pont, était d'obtenir une durée de service de 150 ans avec possibilité de remplacement de la dalle une fois dans la vie du pont. Pour ce faire, des concepts et des matériaux développés au cours des dernières années et appliqués à plus ou moins grande échelle au Québec ou ailleurs en Amérique du Nord ont été utilisés. Ce pont peut être considéré comme le prototype des ponts qui seront construits dans un futur rapproché par le ministère des Transports du Québec.

Les principales caractéristiques incorporées au moment de la conception de ce pont, au niveau des matériaux et du concept structural utilisés, sont les suivantes :

- poutres en acier à haute performance (ASTM A709 grade HPS 485W);
- dalle et glissières en béton haute performance armé à l'aide d'armatures en polymère renforcé de fibres de verre (matériaux composites);
- culées (semi-intégrales avec le tablier) en béton haute performance renforcé à l'aide d'armatures en acier galvanisé.

Cet article présentera plus en détails les différentes hypothèses de conception et les caractéristiques techniques (matériaux, détails, coûts estimés, etc.) incorporées au niveau du concept du pont qui nous le croyons pourraient permettre de répondre à l'objectif audacieux de ce projet soit une durée de service de 150 ans. De même, on y traitera de la construction du pont de Val-Alain.

INTRODUCTION

En Amérique du Nord et plus particulièrement au Québec, l'utilisation de sels de déglacage pour l'entretien d'hiver des routes est la principale cause de la corrosion affectant les ouvrages d'art.

Le ministère des Transports du Québec est constamment à la recherche de techniques permettant de retarder ou d'éliminer la corrosion, qui attaque autant les aciers d'armature présents dans le béton armé (ce qui conduit à la fissuration et à l'éclatement du béton) que l'acier de structure, et ce, en vue de prolonger la durée de service des structures et de diminuer les coûts de réparation et d'entretien sans cesse croissants.

Pour ce faire, plusieurs techniques sont utilisées à l'heure actuelle (béton haute performance, acier galvanisé, membranes d'étanchéité, recouvrement suffisant des armatures, etc.) de façon standard par le Ministère. Toutefois, leur efficacité semble limitée surtout dans le cas des tabliers de pont qui sont exposés à un environnement particulièrement agressif. Nous devons donc trouver des solutions encore plus efficaces, entre autres pour éliminer le problème de corrosion des aciers d'armature dans les tabliers de pont.

Les caractéristiques du pont dont il est question dans cet article ont été déterminées en vue d'obtenir une durabilité optimale. L'objectif audacieux de ce projet est de construire un pont qui nécessitera un minimum d'entretien et de réparation pour une durée de service anticipée de 150 ans. Les principaux travaux prévus à l'intérieur de cette période sont la réparation des culées ainsi que la démolition et la reconstruction de la dalle après 75 ans d'existence.

DESCRIPTION DU PONT

Le pont retenu pour ce projet par le ministère des Transports du Québec se situe sur l'autoroute 20, au-dessus de la rivière Henri, à Val-Alain (Québec). Il remplace un pont de type béquille en béton armé à plusieurs travées construit en 1963. La construction du nouveau pont a eu lieu au cours de l'été 2004.

Il s'agit d'un pont biais (20°) comprenant une seule travée (voir fig. 1 et 2) qui devait être constituée d'un système à 4 poutres en acier à haute performance (acier conforme à la norme ASTM A709 HPS 485W) composites avec la dalle en béton armé de 225 mm d'épaisseur. Des problèmes d'approvisionnement pour ce type d'acier nous ont toutefois obligés à construire les poutres à l'aide d'acier conventionnel (350AT). Un autre projet doit être sélectionné pour construction future avec utilisation de l'acier HPS. Les contreventements et les raidisseurs sont fabriqués à l'aide d'acier conventionnel (350AT). L'espacement entre les poutres est de 3145 mm et la longueur des porte-à-faux est de 1570 mm de chaque côté du tablier. La dalle et les glissières sont construites à l'aide de béton haute performance renforcé entièrement d'armatures en matériaux composites. Les 2 culées sont de type semi-intégral (avec le tablier) et construites à l'aide de béton haute performance renforcé d'armatures en acier galvanisé. La portée du pont est de 47,5 mètres et sa largeur de 12,57 mètres.

ACIER À HAUTE PERFORMANCE

Développement

Les différents types d'acier existant sur le marché possèdent tous une certaine combinaison de propriétés chimiques et mécaniques qui détermine à quel point un acier particulier pourra bien remplir les fonctions escomptées pour une application donnée. La résistance, la soudabilité, la résilience, les propriétés anticorrosion et la ductilité sont toutes des caractéristiques importantes pour déterminer à quel point un acier est performant. Dans le cas qui nous intéresse, un acier à haute performance peut être défini comme possédant un ensemble de caractéristiques lui permettant d'obtenir des performances optimales, ou à tout le moins améliorées par rapport aux aciers conventionnels, tout en demeurant économiquement rentable pour la construction de ponts en acier.

L'acier à haute performance (HPS) a été développé à partir du début des années 1990¹, à l'intérieur d'un programme de recherche coopératif, lancé par trois organismes américains : la *Federal Highway Administration* (FHWA), la *U.S. Navy* et l'*American Iron and Steel Institute* (AISI).

Le but visé par ce programme de recherche était de développer des aciers possédant des limites élastiques minimales de 345, 485 et 690 MPa (F_y) de même qu'une soudabilité améliorée par rapport aux aciers conventionnels utilisés habituellement pour la construction des ponts. Les résultats obtenus de ce programme de recherche ont permis, depuis 1997 et jusqu'à maintenant aux États-Unis, la construction d'environ 150 ponts à l'aide d'acier à haute performance. Pour l'instant, l'acier à haute performance n'est disponible que sur le marché américain.

En plus de la résistance et de la soudabilité, la résilience à basse température (ténacité) et les propriétés anticorrosion ont été améliorées de manière importante par rapport aux aciers conventionnels. De plus, la ductilité des aciers à haute performance est comparable à celle des aciers conventionnels. L'amélioration des propriétés^{1 2 3} des aciers à haute performance (voir tab. 1) est entre autres rendue possible par la diminution du pourcentage de carbone et d'équivalent carbone (augmentation de la soudabilité), par la diminution du pourcentage de soufre (augmentation de la résilience), par la diminution de certains autres éléments d'alliage ainsi que par des procédés de fabrication utilisant des traitements thermiques de l'acier (augmentation de la résistance).

1. A. D. WILSON, « Current Status of High Performance Steel Program », ISG Plate, August 1, 2003. Disponible sur le site Internet de l'AISC à l'adresse suivante : <http://www.steel.org/infrastructure/bridges>

2. V. C. MISTRY, « High Performance Steel for Highway Bridges », FHWA, *Proceedings : 2002 FHWA Steel Bridge Conference for the Western United States*.

3. *High Performance Steel Designers' Guide, Second Edition, April 2002*, U.S Department of Transportation, FHWA. Disponible sur le site Internet de l'AISC à l'adresse suivante : <http://www.steel.org/infrastructure/bridges>

Des pratiques recommandées de soudure et des produits d'apport ont pu être développés pour utilisation avec ce nouveau type d'acier. Un guide intitulé *Guide Specification for Highway Bridge Fabrication with HPS 70W (HPS 485W) Steel 2nd Edition, June 2003*⁴ a été produit par l'AASHTO à ce sujet. Ce guide contient les recommandations les plus récentes concernant la fabrication et le soudage de structures fabriquées à l'aide d'acier ASTM A 709 HPS 485W.

Par le biais de ce projet, qui était à notre connaissance le premier au Canada dans lequel l'acier à haute performance devait être utilisé, la Direction des structures du ministère des Transports du Québec désirait s'assurer de la capacité des fabricants québécois à obtenir des résultats de qualité avec l'utilisation de ce nouveau type de matériau et ainsi valider les pratiques recommandées et les expériences vécues par nos voisins américains chez qui l'acier à haute performance a été développé. Toutefois, cet objectif devra être poursuivi à l'intérieur d'un autre projet.

Avantages au point de vue de la durabilité

En ce qui a trait à la durabilité, les principales caractéristiques qui nous intéressent sont les améliorations importantes des propriétés anticorrosion, de la résilience à basse température et de la soudabilité. En effet, un des objectifs de ce projet était de pouvoir conserver les poutres en service pour une durée de 150 ans.

De toute évidence, les propriétés anticorrosion de cet acier sont un facteur important qui nous aidera à atteindre cet objectif pour le moins audacieux. Cette caractéristique est mesurée à l'aide de la norme ASTM G101 « Estimating the Atmospheric Corrosion Resistance of Low-Alloy Steels³ ». Sur une échelle de 10, l'indice minimal de résistance à la corrosion de l'acier HPS 485W est de 6,5 comparativement à un indice minimal de 6 pour les aciers 345W (350AT) ou 485W conventionnels. Des essais de corrosion atmosphérique à long terme sont présentement en cours aux États-Unis pour permettre de valider cette projection³.

La seconde propriété mentionnée précédemment, soit la résilience à basse température, est beaucoup plus élevée^{3 5} dans le cas d'un acier HPS (voir fig. 3), et elle se traduit aussi par une tolérance à la fissuration plus importante. Cette propriété nous permettra de bénéficier d'un laps de temps beaucoup plus long pour détecter et réparer des fissures de fatigue (qui pourraient se produire à très long terme) bien avant que le pont ne présente un danger pour les usagers.

4. *Guide Specification for Highway Bridge Fabrication with HPS 70W (HPS 485W) Steel, 2nd edition, June 2003.* Disponible sur le site Internet de l'AISC à l'adresse suivante : <http://www.steel.org/infrastructure/bridges>

5. J. W. FISHER et W. J. WRIGHT, « High Toughness of HPS : Can It Help You in Fatigue Design », *Proceedings – Steel Bridge Design and Construction for the New Millenium with Emphasis on High Performance Steel*, p. 44–58.

Bien que les études effectuées jusqu'à ce jour n'aient pas permis de démontrer une augmentation de la résistance à la fatigue de l'acier HPS par rapport aux aciers conventionnels⁵, on peut toutefois espérer que la soudabilité améliorée de celui-ci (diminution du préchauffage [voir tab. 2], diminution de la susceptibilité à la fissuration à froid du métal de base) permettra d'obtenir des soudures contenant moins de défauts sujets à diminuer la résistance des poutres à la fatigue. Pour l'instant, on doit dimensionner les poutres fabriquées à l'aide d'acier HPS en appliquant les limites d'écart de contrainte, pour les diverses catégories de détail de fatigue, telles que prescrites dans les normes actuelles. Il est à noter que différentes universités canadiennes sont impliquées dans la recherche à ce propos. Ces recherches serviront à évaluer la performance en termes de fatigue et permettront ainsi l'avancée des connaissances à ce sujet.

Étant donné que les poutres n'ont pu être construites à l'aide d'acier HPS, notre objectif en termes de durée de service sera vraisemblablement hypothéqué car nous ne pourrions bénéficier des améliorations au niveau des caractéristiques mentionnées précédemment. Toutefois, comme nous le verrons dans la suite de cet article, le pont de Val-Alain possède beaucoup d'autres caractéristiques qui lui permettront d'obtenir une durabilité supérieure aux ponts tel qu'on les conçoit actuellement au Québec.

Dimensionnement

En général, pour des ponts de portée plus courte que ± 65 m, le critère qui gouverne le dimensionnement des poutres est plus souvent qu'autrement l'état limite de fatigue. En fait, pour des travées dans cet ordre de longueur, on ne peut bénéficier du gain de résistance de l'acier (485 MPa vs 350 MPa) et ainsi diminuer la section transversale de la poutre pour obtenir une économie de matériaux. Pour l'avenir, une utilisation plus efficace de l'acier à haute performance passerait par une amélioration du point de vue fatigue des détails d'assemblage soudé et par une meilleure caractérisation du phénomène de fatigue pour ce type d'acier. Cela pourrait peut-être permettre d'augmenter les écarts de contrainte permis présentement.

Les vérifications ayant trait aux états limites ultimes et de services ont été effectuées en considérant l'utilisation d'acier conforme à la norme CAN/CSA-G40.21M, nuance 350AT ($F_y = 350$ MPa). Le ministère des Transports se ménageait ainsi la possibilité de substituer de l'acier conventionnel à l'acier HPS durant les travaux pour palier à des problèmes d'approvisionnement possibles sur le marché américain et ainsi ne pas gêner à la mise en œuvre du projet.

Pour plus d'information concernant la conception des poutres fabriquées à l'aide d'acier à haute performance voir les références suivantes : ^{3, 6} et ⁷.

6. ATOROD AZIZINAMINI, Ph. D., P.E., « High Performance Steel : Research Front – An Historical Account of Research Activities », TRB 2002 Annual Meeting CD-Rom, Original paper submittal – Not revised by author.

7. A. J. YAKEL, P. MANS, A. AZIZINAMINI, « Flexural Capacity and Ductility of HPS – 70W Bridge Girders » et M. G. BARKER, A. M. HURST, O. W. WHITE, « Tension Field Action in Hybrid Steel Girders ».

ARMATURES EN MATÉRIAUX COMPOSITES

Généralités

Depuis la fin des années 1990, la Direction des structures du ministère des Transports du Québec s'intéresse à l'utilisation des armatures en matériaux composites à l'intérieur des tabliers de pont. Cet intérêt s'est traduit depuis par l'amorce de plusieurs projets de recherche, menés en collaboration avec l'Université de Sherbrooke, portant entre autres sur l'utilisation de ce type de matériau à l'intérieur des dalles⁸ et des glissières de pont^{9 10}. De plus, plusieurs applications à titre expérimental sur pont réel ont été effectuées : pont Joffre dans la municipalité de Sherbrooke, pont Wotton dans la municipalité de Wotton, pont sur l'autoroute 55 Nord à Magog, pont sur la route 108 à Cookshire (voir fig. 4) et pont de Val-Alain, le dernier en liste.

Les matériaux composites possèdent un avantage très intéressant sur l'acier : leur grande immunité contre la corrosion. En contrepartie, leur coût est en général plus important en particulier pour les armatures en polymère renforcé de fibres de carbone (PRFC). Pour cette raison, le Ministère favorise l'utilisation des armatures en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV).

Contrairement à l'acier, les matériaux composites demeurent dans le domaine élastique jusqu'à la rupture qui se veut soudaine (aucun plateau plastique). Théoriquement, on ne peut compter sur une plastification du matériau qui permettrait de très larges déformations, et de ce fait donnerait un « avertissement » avant la rupture de la pièce. De plus, la durabilité des armatures en PRFV est affectée¹⁵ par la présence d'eau, par l'alcalinité du béton et par l'intensité des contraintes engendrées par les charges constantes. Une méthode sécuritaire de dimensionnement applicable aux matériaux composites doit tenir compte de ces limitations.

Bien qu'au cours des dernières années, des améliorations majeures aient été apportées aux armatures en PRFV, et que toutes les précautions nécessaires aient été prises lors de la conception, il n'en demeure pas moins que l'utilisation des matériaux composites dans les ouvrages d'art reste très récente. Pour le moment, la Direction des structures préfère n'utiliser ces matériaux qu'à l'intérieur d'éléments relativement peu sollicités structurellement sous charge constante, soit la dalle et les glissières de pont.

8. G. DESGAGNÉ et B. BENMOKRANE, « Construction d'un pont routier alliant des matériaux composites avancés et un système de télésurveillance à distance », *Innovation Transport*, n° 16, avril 2003, p. 15-19.
<http://www.mtq.gouv.qc.ca/cqtt>

9. G. DESGAGNÉ et B. BENMOKRANE, « Conception des glissières de béton renforcées avec de l'armature en matériaux composites », *Innovation Transport*, n° 11, octobre 2001, p. 3-6.

10. E. EL-SALAKAWY, B. BENMOKRANE, R. MASMOUDI, F. BRIÈRE et É. BEAUMIER, « Concrete Bridge Barriers Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Composite Bars », *ACI Structural Journal*, Vol. 100, No. 6, Nov. -Dec. 2003, p. 815-824.

Critères de dimensionnement pour la dalle

Les matériaux composites font maintenant l'objet d'un chapitre (chapitre 16) dans le Code canadien pour le calcul des ponts routiers (CAN/CSA S6-00)¹¹. Ce chapitre, bien qu'incomplet au sujet des équations de calculs, contient toutefois l'information minimale nécessaire à la conception d'une dalle renforcée à l'aide de matériaux composites (coefficient de tenue des matériaux, critère de ductilité, recouvrement minimal de béton). Ces informations ont été complétées à l'aide de diverses sources^{12 13 14 15} qui nous ont permis de déterminer une méthode de calcul qui, nous le croyons, se veut sécuritaire aux états limites ultimes et qui devrait nous permettre d'obtenir de bons résultats quant aux états limites de service et à la durabilité à long terme.

Les principaux critères de dimensionnement sont les suivants :

- Analyse à l'aide d'une méthode élastique pour l'obtention des efforts de flexion engendrés dans la dalle.
- Rapport d'armature suffisant pour s'assurer qu'il n'y aura pas de rupture possible dans l'armature avant que la rupture ne se produise par écrasement du béton à l'ultime. Il faut vérifier par la suite que la pièce possède une réserve de résistance suffisante par rapport aux efforts pondérés.
- Respect du critère de ductilité retrouvé dans la norme S6-00.
- Ouverture des fissures limitée à 0,5 mm (comparativement à 0,3 mm pour des armatures d'acier).
- Limitation des contraintes dans les armatures à l'état limite d'utilisation (ÉLUT 1 de S6-00) et sous charges constantes.

11. Code canadien pour le calcul des ponts routiers, CAN/CSA S6-00, Norme nationale du Canada, CSA International.

12. Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, ACI 440.1R-03, American Concrete Institute.

13. Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, Design Manual No. 3, Sept. 2001, ISIS Canada. www.isiscanada.com

14. J. R. YOST et S. P. GROSS, « Flexural Design Methodology for Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymers », *ACI Structural Journal*, Vol. 99, No. 3, May-June 2002, p. 308–316.

15. R. MASMOUDI, G. NKURUNZIZA, B. BENMOKRANE et P. COUSIN, « Durability of Glass FRP Composite Bars for Concrete Structure Reinforcement under Tensile, Sustained Load in Wet and Alkaline Environments », Congrès annuel de la Société canadienne de génie civil, juin 2003.

Il faut toutefois mentionner qu'en général, pour le cas d'une dalle de tablier, le critère relié à la fissuration gouverne le dimensionnement. Les autres états limites ultimes et de services étant respectés d'une manière presque intrinsèque.

Glissières

Dès 1998, la Direction des structures amorçait la révision de la conception des glissières de pont pour satisfaire aux exigences de la nouvelle norme S6-00 « Code canadien sur le calcul des ponts routiers ». Parallèlement à cette révision, un projet de recherche portant sur l'utilisation d'armatures en matériaux composites pour la construction des nouvelles glissières^{9 10} a été entrepris en collaboration avec l'Université de Sherbrooke.

Le but de cette recherche était de démontrer que le comportement de glissières en béton armé à l'aide de matériaux composites était au moins équivalent à celui de glissières en béton armé à l'aide d'acier d'armature conventionnel conçues selon les exigences de la nouvelle norme S6-00. Cette recherche devait aussi permettre de valider une nouvelle connexion, constituée d'armature en matériaux composites, entre la glissière et la dalle de béton d'un tablier de pont.

Le projet consistait en deux points :

- 1) Essais de chargement statique en laboratoire jusqu'à la rupture pour vérifier différents dimensionnements de glissières en matériaux composites.
- 2) Essais d'impact à l'extérieur pour comparer le comportement des glissières renforcées de matériaux composites à celui de celles renforcées d'acier.

De façon générale, les résultats de la comparaison du comportement des deux types de glissières au moment de l'impact ont permis de conclure que celles-ci ont des performances très similaires quant à la fissuration, à l'absorption d'énergie et à la résistance ultime.

Le pont de Val-Alain constitue la première utilisation concrète en chantier des glissières renforcées à l'aide de matériaux composites développées à l'intérieur de ce projet de recherche.

Instrumentation

L'utilisation d'instruments de mesure (capteurs à fibre optique et autres) qui seront installés par l'Université de Sherbrooke au niveau des armatures et de la dalle de béton et reliés à un système d'acquisition de données fixé à même le pont nous permettra de vérifier par télésurveillance le comportement du pont sous sollicitation (déformation) sans nous déplacer sur le terrain. Ce moyen de contrôle, utilisé conjointement avec la possibilité de prélever des échantillons d'armatures sur la structure, nous permettra entre autres de mieux nous assurer de l'état des armatures à long terme (durabilité) et ainsi de prendre une décision plus éclairée quant à l'utilisation à grande échelle de ce matériau novateur.

Propriétés et configuration des armatures en matériaux composites

Pour ce projet, l'armature en matériaux composites (PRFV) a été utilisée pour toutes les nappes d'armatures dans la dalle et les glissières. La figure 5 donne en détail les diamètres, l'espacement et le recouvrement des armatures pour ce projet. De plus, le tableau 3 présente les diverses propriétés des armatures utilisées.

CULÉES SEMI-INTÉGRALES

Les ponts semi-intégraux^{16 17 18} sont des ponts à travée simple ou multiple à fondation rigide pour lesquels la dalle de béton du tablier est rendue continue avec la dalle d'approche. Les joints de dilatation sont éliminés aux extrémités du tablier; toutefois, celui-ci est pratiquement indépendant des culées, d'où l'appellation « semi-intégral ». Des appareils d'appui conventionnels sont utilisés pour permettre le mouvement horizontal relatif dans l'axe du pont entre le tablier et les culées. Pour le cas d'un pont en biais, les appuis doivent permettre la retenue transversale des poutres pour contrôler l'effet de la rotation induite dans le tablier par la poussée du sol à chaque extrémité de celui-ci.

Ce type de pont est de plus en plus utilisé en Amérique du Nord où plusieurs États américains et la province de l'Ontario ont développé des critères de conception et certains détails typiques.

Le principal avantage d'une culée semi-intégrale par rapport à une culée conventionnelle réside dans l'élimination des joints de dilatation au niveau du tablier. Toutefois, on doit quand même prévoir des joints permettant les mouvements relatifs et assurant l'étanchéité entre le tablier et la culée (incluant les murs en retour), ainsi qu'à l'extrémité des dalles d'approche (voir fig. 5, 6 et 7). Malgré que le nombre de joints soit plus important, ce concept réduit la vulnérabilité du pont aux bris possibles ou au manque d'entretien des joints conventionnels. Dans l'éventualité où les joints d'un pont à culées semi-intégrales seraient endommagés, les conséquences de leur mauvais fonctionnement demeureraient beaucoup moins néfastes que celles reliées au mauvais fonctionnement d'un joint conventionnel. On n'a qu'à penser aux coûts reliés à l'endommagement des unités de fondation, des appareils d'appuis et de l'extrémité des poutres localisées sous un joint conventionnel dont l'étanchéité est déficiente. De plus, les coûts d'entretien reliés à ces types de joints sont beaucoup moins importants que ceux relatifs à un joint conventionnel.

16. *Semi-Integral Abutment Bridges, Report BO-99-03*, Ministry of Transportation, Bridge Office, Ontario.

17. DANIEL BERNARD, « Ponts à culées intégrales et semi-intégrales », *Recueil des communications, Congrès annuel de l'AQTR*, avril 1998.

18. MARTIN P. BURKE, Jr, « Semi-Integral Bridges : Movements and Forces », *Transportation Research Record 1460*.

CARACTÉRISTIQUES SUPPLÉMENTAIRES

En plus des différentes caractéristiques dont il a été question précédemment, la conception de ce pont a nécessité l'emploi de divers matériaux et techniques maintenant utilisés de manière courante par le ministère des Transports du Québec.

Ces matériaux et techniques ont tous été inclus à l'intérieur de ce projet en raison de leur efficacité qui a pu être expérimentée et confirmée au cours des ans. On pense entre autres à l'utilisation de béton haute performance pour tous les éléments en béton de ce pont (autres que les semelles aux unités de fondation) en raison de sa plus grande résistance à la fissuration et de sa perméabilité inférieure à celle d'un béton conventionnel, à l'utilisation d'acier galvanisé en guise d'armature à l'intérieur des culées et des diaphragmes d'extrémité du tablier, à la membrane d'étanchéité préfabriquée installée sur le tablier et les dalles d'approche, aux recouvrements de béton importants des aciers d'armature, etc.

ANALYSE ÉCONOMIQUE

Pour mieux évaluer l'impact des coûts supplémentaires associés à l'utilisation de ces nouvelles technologies, une étude comparant les coûts reliés à la construction d'un pont d'une durée de vie anticipée de 150 ans aux coûts reliés à la construction d'un pont de même configuration tel qu'on les conçoit au Québec actuellement (acier 350AT, béton haute performance et armature galvanisée pour le tablier, culées conventionnelles, joints à garniture, etc.) nous a permis de vérifier certains points intéressants.

Bien entendu, les coûts initiaux de construction du pont sont plus élevés pour le pont décrit dans ce document que pour un pont correspondant aux normes de conception actuelles. Toutefois, la différence de coût entre les deux options s'amenuise très fortement lorsqu'on étudie tous les autres frais engendrés pour une période de 150 ans. Ces frais incluent, entre autres, l'organisation de chantier, le terrassement et l'enrobé aux approches, le maintien de la circulation et la signalisation, les chemins de déviation, la remise en état des lieux, tous les frais reliés à l'entretien et à la réparation selon les deux options, tous les frais reliés à la reconstruction selon l'option du pont conventionnel ainsi que les coûts engendrés pour les usagers à l'occasion de chacune des interventions effectuées par le ministère des Transports sur le pont. Il faut toutefois noter que les frais reliés à l'instrumentation et à la télésurveillance n'ont pas été inclus dans l'étude économique.

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse économique effectuée. Cette étude a été réalisée à l'aide du logiciel Bridge LCC 2.0¹⁹. Les valeurs des taux d'inflation et d'intérêt qui ont été utilisés sont respectivement de 1,9 % et 3,4 %, valeurs suggérées pour des analyses économiques à long terme. Au tableau 5, on trouve les coûts relatifs à la construction initiale, ceux liés à certains items particuliers pour les deux options étudiées de même que les prix soumis en 2004 pour le pont de Val-Alain.

19. Bridge LCC, Version 2.0, Standard Life – Cycle Cost Analysis Software, National Institute of Standard and Technology.

On remarque que la portion la plus importante du coût total de ce pont pour sa durée de service anticipée de 150 ans est encourue au moment de la construction initiale et que la majeure partie de la différence entre les deux options pour les coûts de construction initiaux concerne l'acier de charpente, l'armature en matériaux composites et les joints de dilatation et d'étanchéité des culées semi-intégrales. De plus, la différence entre les coûts totaux des deux options pour la période d'étude de 150 ans est très faible (1,9 %) bien que les matériaux utilisés soient relativement nouveaux.

D'un point de vue strictement économique, nous croyons qu'une utilisation à plus grande échelle, dans un futur rapproché, de l'acier à haute performance et de l'armature en matériaux composites pourrait permettre une diminution des coûts unitaires de ces deux matériaux. Par le fait même, les coûts de certains projets seraient probablement abaissés à un niveau permettant d'obtenir un coût de construction initial compétitif et un coût sur la vie utile inférieur à ceux des ponts conçus selon les normes actuelles.

CONSTRUCTION DU PONT DE VAL-ALAIN

La construction de ce pont s'est étendue sur une période de 4 mois, soit de juillet à la fin du mois d'octobre 2004. Le temps requis ne semble pas avoir été plus long que celui requis pour la construction d'un pont conventionnel.

Mise à part l'impossibilité d'obtenir l'acier à haute performance pour la fabrication des poutres (délai de livraison des plaques d'acier de 16 semaines), les autres matériaux prévus aux plans et devis ont pu être obtenus sans difficultés (matériaux composites, matériaux pour joints d'étanchéité, etc.). De même, les divers détails particuliers prévus au niveau des plans et devis ont été construits avec succès par l'entrepreneur réalisant les travaux. Bien sûr, certains ajustements ont dû être apportés en cours de chantier, mais ceux-ci sont d'ordre mineur et n'affectent en aucun cas la qualité de l'ouvrage obtenu.

Les diverses exigences supplémentaires s'appliquant à la construction d'un pont semi-intégral n'ont pas causé de problèmes particuliers. Ces exigences sont comme suit :

- Les diaphragmes d'extrémité (voir fig. 8 et 9) doivent être construits avant de procéder à la mise en place des coffrages de la dalle.
- La dalle doit être construite et le béton de celle-ci doit avoir atteint au moins 70 % de la résistance à la compression exigée à 28 jours avant de procéder à la mise en place du remblai à l'arrière des diaphragmes d'extrémité.
- La mise en place du remblai à l'arrière des diaphragmes d'extrémité doit être effectuée simultanément à chaque culée en limitant la différence d'élévation à 300 mm.

Ce projet confirme aussi les expériences passées vécues à l'intérieur d'autres projets où des portions de dalle ont été armées à l'aide d'armatures en matériaux composites. Ces armatures sont 4 fois plus légères que des armatures en acier, elles sont beaucoup plus flexibles mais toutefois très résistantes (manipulation en chantier, etc.) et elles ne sont pas conductrices (moins froides en période de temps froid). Bien que celles-ci soient plus légères, on ne remarque aucune augmentation de leur rapidité d'installation dans le tablier. Cette observation a été confirmée à l'intérieur de deux projets réalisés par deux entrepreneurs différents. En fait, ces gens mentionnaient que les armatures en PRFV (voir. fig. 10) ne changeaient rien dans leur cas (facilité d'installation, etc.). Il faut toutefois préciser que les espacements entre les barres sont plus faibles pour des armatures en PRFV que pour des armatures en acier. Il y a donc un nombre plus important de barres en PRFV à installer dans le tablier. Certaines précautions doivent être prises avec ce type de matériau. Les armatures doivent être protégées de la lumière du soleil pendant l'entreposage, elles ne doivent pas être pliées en chantier (en fait elles ne sont pas pliables) et on doit prévoir un espacement moins important entre leurs supports (flexibilité importante) pour la dalle.

Pour terminer ce bref exposé au sujet de la construction de ce pont, nous pouvons clairement affirmer que les divers matériaux et concepts prévus aux plans et devis peuvent être utilisés sans difficultés particulières au niveau de la réalisation en chantier.

CONCLUSION

Les caractéristiques du pont ont été déterminées en vue d'obtenir une durabilité optimale, notamment par l'utilisation d'armatures en matériaux composites. L'utilisation de ces armatures permet d'éliminer le problème de corrosion de l'armature d'acier (normalement utilisée pour renforcer la dalle et les glissières de sécurité des ponts) qui conduit à l'éclatement, à la fissuration et à la désagrégation du béton. La construction de ce pont marquera un pas de plus vers l'adoption d'une méthode de calcul adéquate en termes de comportement structural à l'ultime et en service, de même qu'en termes de durabilité, et vers le développement d'un contrôle de qualité fiable; ces progrès pourront éventuellement ouvrir la porte à l'utilisation à grande échelle de ce matériau novateur.

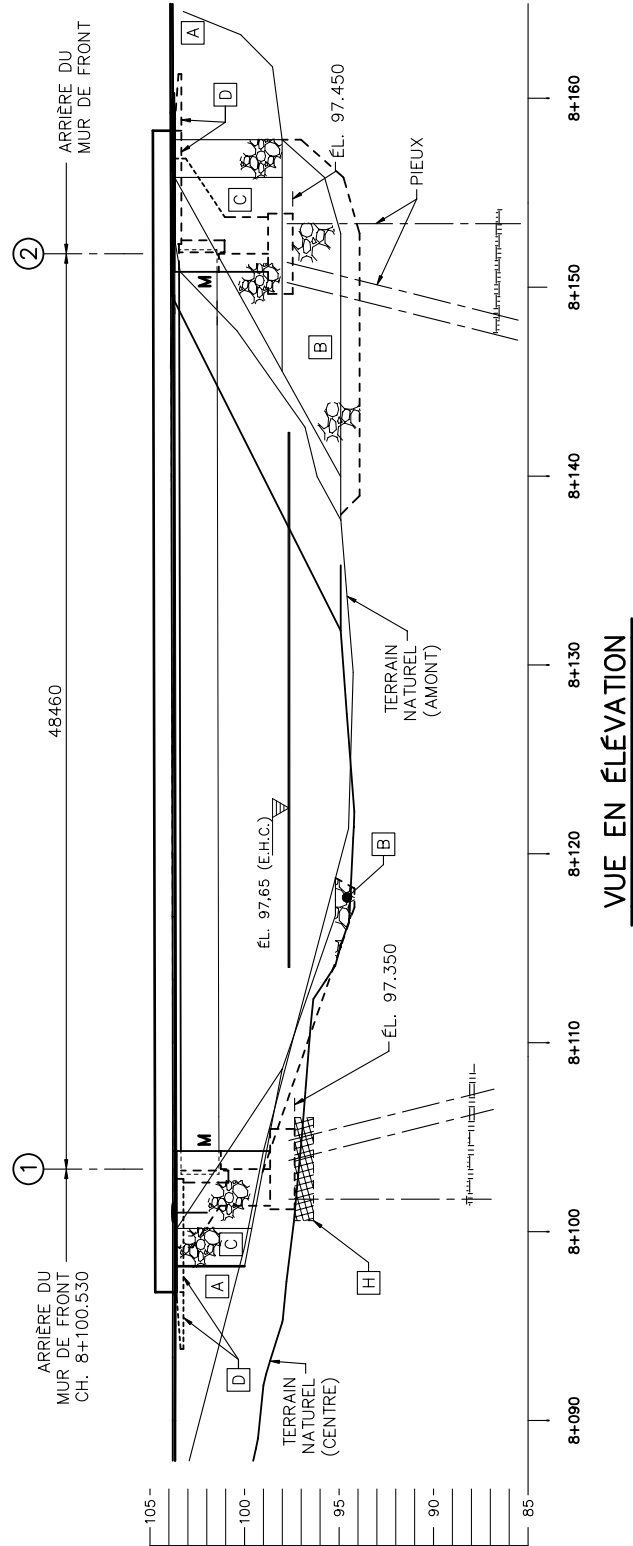
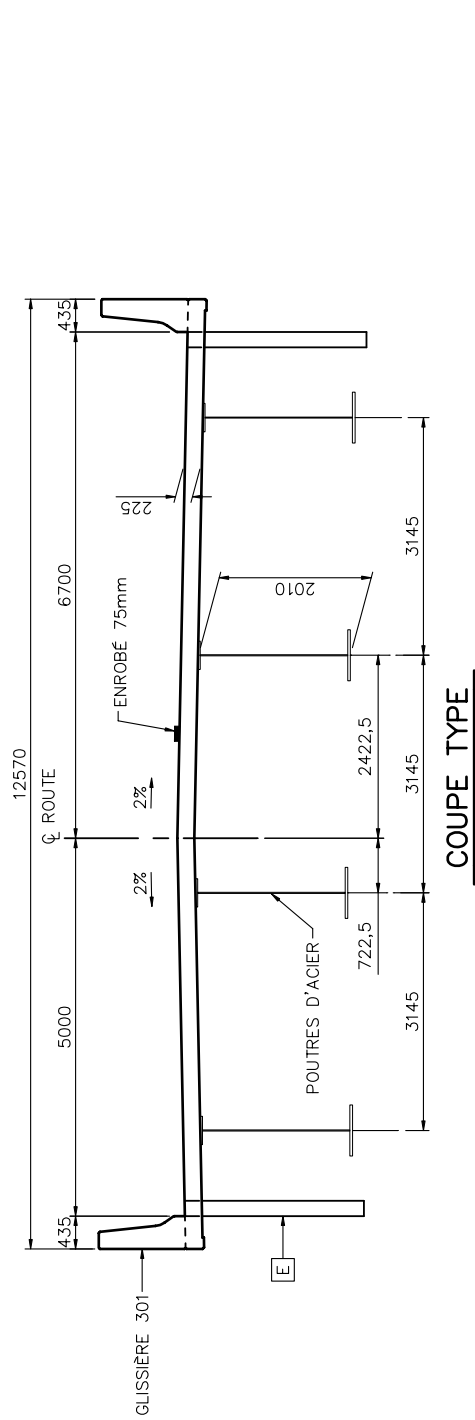
De même, l'emploi d'acier à haute performance pour la fabrication de poutres devrait nous permettre de profiter des améliorations notables, par rapport à l'acier patinable conventionnel, quant aux propriétés anticorrosion, à la résilience à basse température et à la soudabilité de ce nouveau matériau.

De plus, le concept de tablier semi-intégral rend possible l'élimination des joints de tablier aux culées. Les joints sont plutôt localisés à l'extrémité des dalles d'approche dans une zone où les possibles fuites ou le mauvais fonctionnement de ceux-ci, inévitables avec le temps, ne causeront pas de dommage aux culées ni au tablier du pont. Ce concept est utilisé de façon courante dans plusieurs États américains et, dans certains cas, en Ontario où des critères de conception et des détails types ont été développés. Éventuellement, selon les résultats obtenus avec le pont de Val-Alain, le ministère des Transports du Québec pourrait lui aussi utiliser ce type de pont plus fréquemment.

Enfin, il est à noter que certains matériaux maintenant standardisés tels que le béton à haute performance, l'acier galvanisé et la membrane d'étanchéité préfabriquée, ainsi que les règles de bonnes pratiques courantes (recouvrement minimal de béton sur les armatures, cure du béton, etc.) ont été appliqués à la conception de ce pont en raison de leur efficacité qui a pu être expérimentée et confirmée au cours des ans.

En ce qui a trait à l'analyse économique effectuée pour ce pont, il nous semble que l'utilisation de ces différents matériaux et concepts à plus grande échelle pourrait permettre une diminution des coûts totaux reliés à la construction et à l'entretien du parc de ponts appartenant au ministère des Transports du Québec.

Finalement, mise à part l'impossibilité d'utiliser de l'acier à haute performance pour la fabrication des poutres, la réalisation en chantier de ce projet nous a permis de confirmer la constructibilité du pont tel que prévu aux plans et devis.



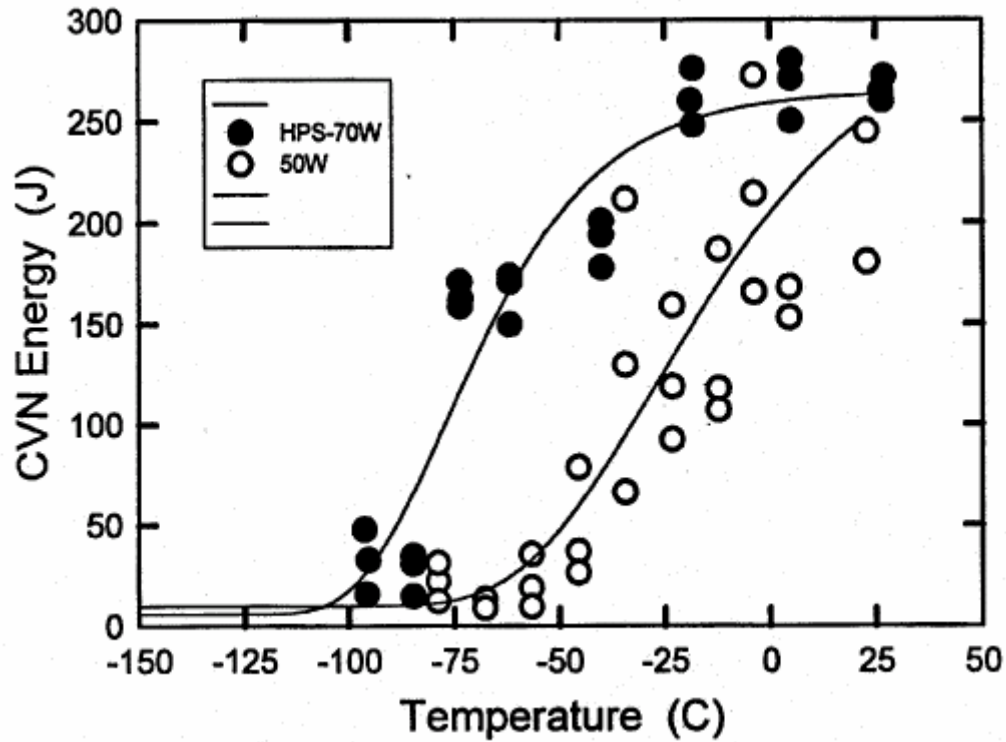
Géométrie du pont

Figure 1



Pont de Val-Alain
Figure 2

**ESSAI DE RÉSILIENCE CHARPY
COURBE DE TRANSITION POUR LA RUPTURE (DUCTILE – FRAGILE)**



HPS-70W = HPS 485W en métrique
50W = 345W en métrique

Tiré de « High Performance Steel Designer's Guide »

La transition ductile – fragile de l'acier à haute performance (HPS 485W) se produit à une température beaucoup plus basse que celle d'un acier conventionnel de nuance 345W.

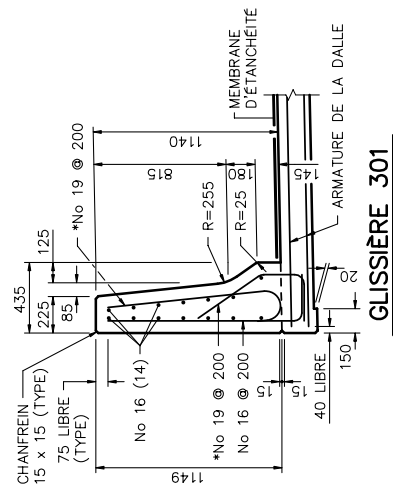
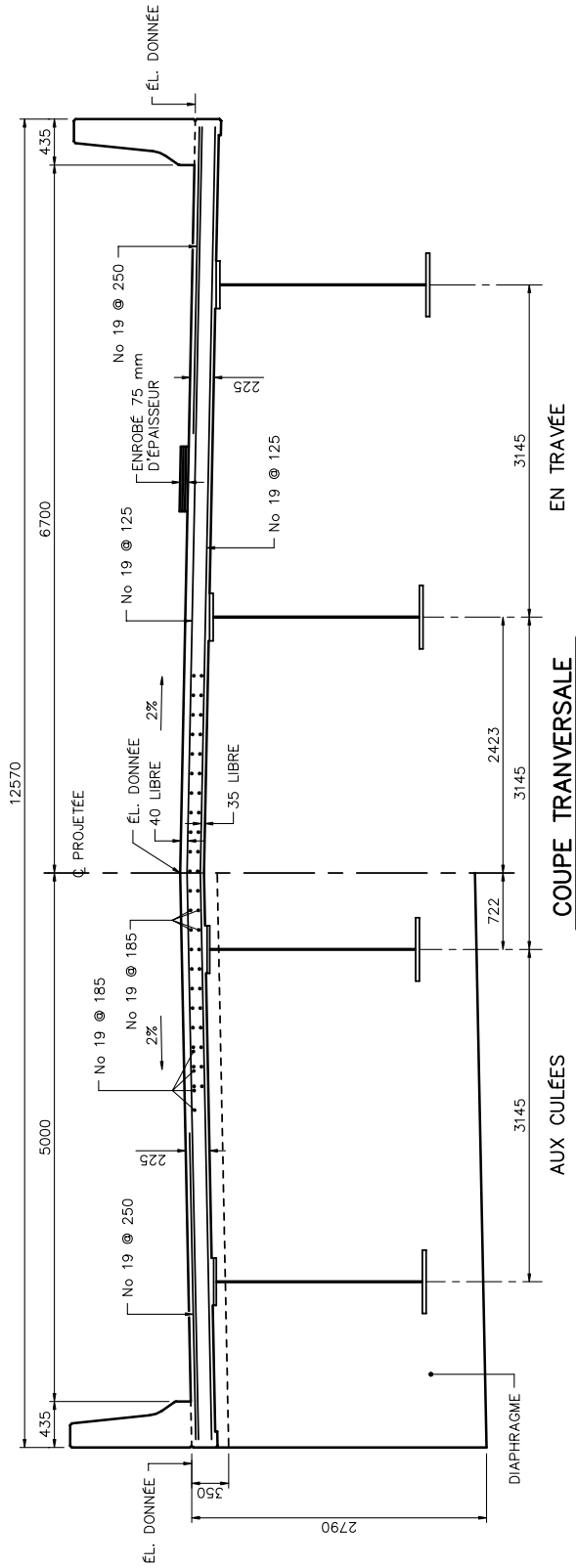
**Essai de résilience Charpy
Courbe de transition pour la rupture (ductile – fragile)**

Figure 3



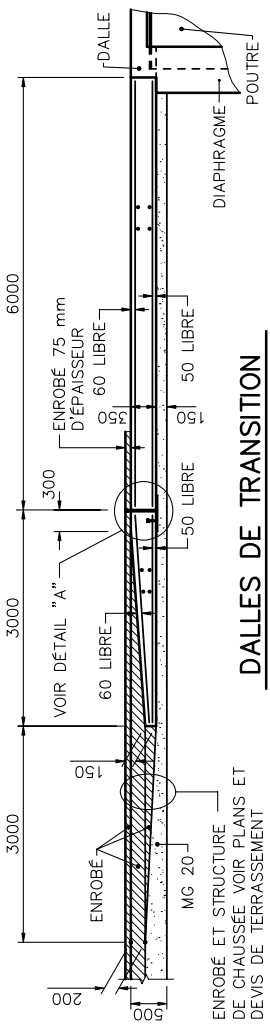
**Installation d'armatures en matériaux composites
Pont sur la route 108 à Cookshire (Québec)**

Figure 4



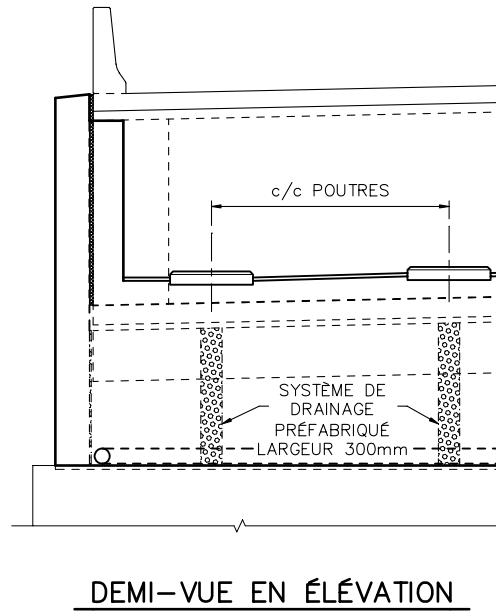
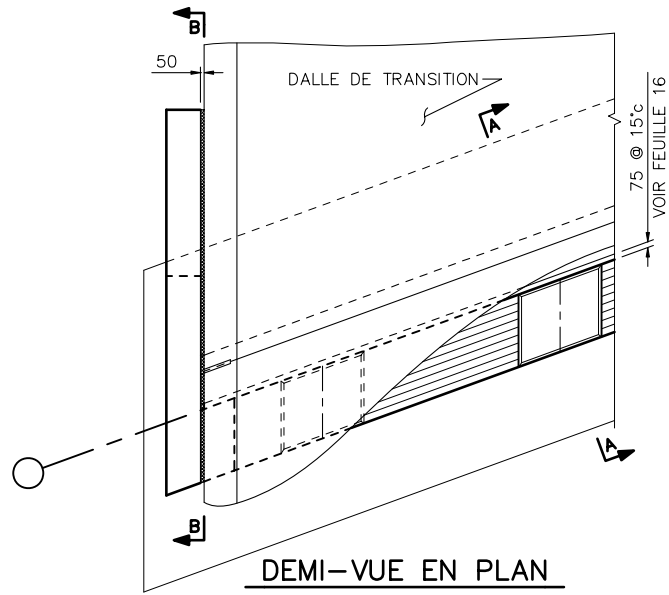
* L'ESPACEMENT DES GL2 ET GL3 EST RÉDUIT À 100 mm SUR UN MÈTRE DE PART ET D'AUTRE D'UN JOINT DE CONTRÔLE ET ÉGALEMENT SUR UN MÈTRE AUX EXTRÉMITÉS.

NOTES: - POUR LA COUPE A-A, VOIR FEUILLE 15
 - LES EXTRÉMITÉS DE LA DALLE DE TRANSITION DE 6000 mm ET DES GLISSIÈRES DOIVENT ÊTRE CONSTRUITES PERPENDICULAIREMENT À L'AXE DU PONT, L'ÉTANCHÉITÉ ENTRE LA BORDURE PRÉFABRIQUÉE EN BÉTON DE CIMENT ET LA DALLE DE TRANSITION AINSI QUE LA GLISSIÈRE DOIT ÊTRE ASSURÉE PAR L'INSTALLATION D'UNE PIÈCE D'ÉVAZOTE (VOIR DEVIS SPÉCIAL POUR PLUS DE DÉTAIL).



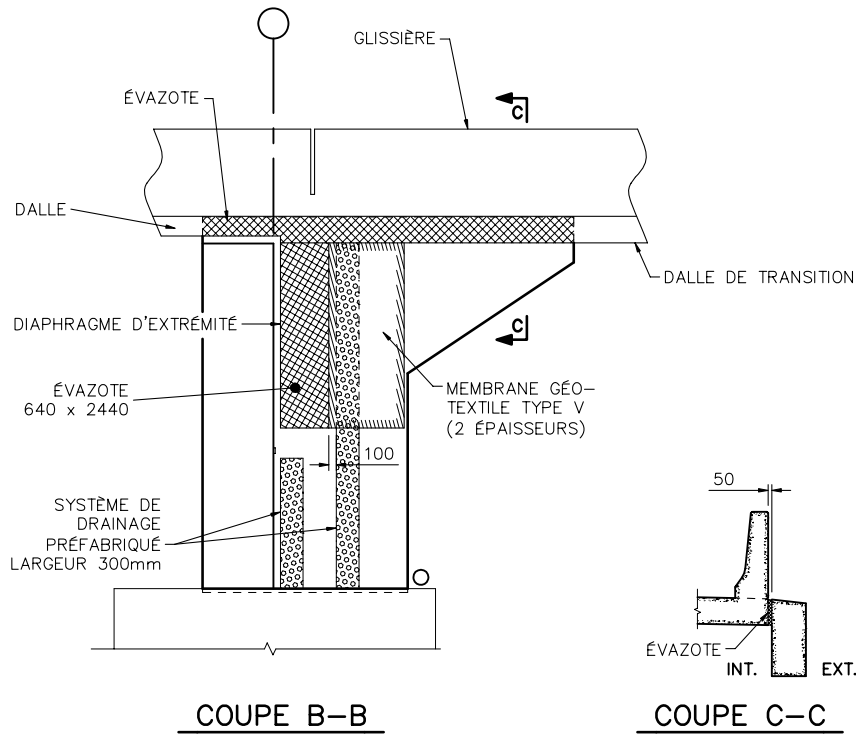
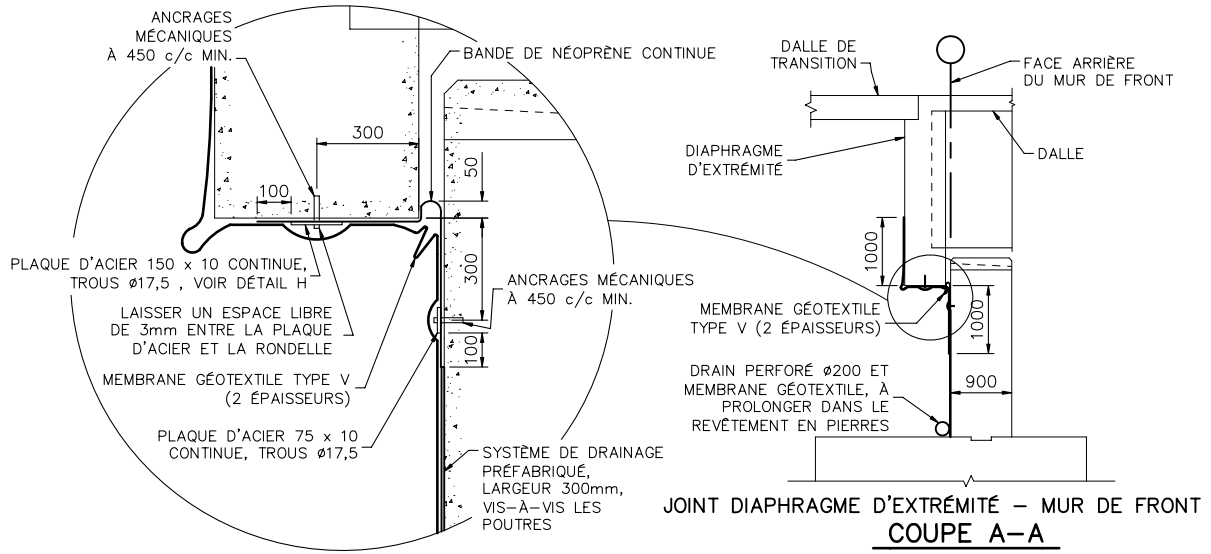
Détails d'armature (dalle et glissières)

Figure 5



Joint pour pont semi-intégral

Figure 6



Joint pour pont semi-intégral

Figure 7



**Construction d'un diaphragme d'extrémité
Pont de Val-Alain**

Figure 8



**Construction d'un diaphragme d'extrémité
Pont de Val-Alain**

Figure 9



**Installation d'armatures en matériaux composites
Pont de Val-Alain**

Figure 10

PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET CHIMIQUES – ACIER DE CHARPENTE			
Type d'acier	ASTM A709 HPS 485W	CSA-G40.21M 350AT	ASTM A709 485W (n'existe plus)
Propriétés mécaniques			
Fy	485 MPa	350 MPa	485 MPa
Fu	585-760 MPa	480-650 MPa	--
Essai de résilience Charpy			
Température d'essai :	- 23 °C * - 23 °C *	- 20 °C ** - 20 °C **	--
Énergie min. moy. :	34 J * 48 J *	27 J ** 40 j **	--
Composition chimique (%) ***			
Carbone (C)	0,11 max.	0,20 max.	0,19 max.
Manganèse (Mn)	1,10-1,35	0,75-1,35	0,80-1,35
Phosphore (P)	0,020 max.	0,03 max.	0,035 max.
Souffre (S)	0,006 max. ****	0,04 max.	0,04 max.
Silicium (Si)	0,30-0,50	0,15-0,50	0,20-0,65
Cuivre (Cu)	0,25-0,40	0,20-0,60	0,20-0,40
Nickel (Ni)	0,25-0,40	0,90 max.	0,50 max.
Chrome (Cr)	0,45-0,70	0,70 max.	0,40-0,70
Vanadium (V)	0,04-0,08	0,10 max.	0,02-0,10
Molybdène (Mo)	0,02-0,08	--	--
Aluminium (Al)	0,010-0,040	--	--
Azote (N)	0,015 max.	--	--

* Zones 1, 2 et 3 selon la norme ASTM A709. Pour membrures principales tendues et membrures à résistance critique à la rupture respectivement.

** Zone de température de service : - 30 °C > Ts ≥ - 60 °C selon la norme CAN/CSA S6-00. Pour membrures principales tendues et membrures à résistance critique à la rupture respectivement.

*** Pour plus de détails voir les normes pertinentes.

**** L'acier doit être traité au calcium pour le contrôle des inclusions.

Propriétés mécaniques et chimiques – Acier de charpente

Tableau 1

**TEMPÉRATURE MINIMUM DE PRÉCHAUFFAGE ET DE MAINTIEN ENTRE LES
PASSES DE SOUDURE LORS DU SOUDAGE DE L'ACIER ASTM A709 HPS 485W**

TABLE 3. Minimum Preheat and Interpass Temperature for HPS 70W (HPS 485W), °F (C) ^a

Welding Process	H _a Max.	Thickness of Thickest Part at Point of Welding, in. (mm) ^b			
		To 3/4 (19) incl.	Over 3/4 (19) to 1-1/2 (75) incl.	Over 1-1/2 (75) to 2-1/2 (64) incl.	Over 2-1/2 (64)
SAW, SMAW ^c	4 ml/100 g	50 (10)	70 (20)	70 (20)	125 (50)
FCAW, GMAW ^{c, d, e}	4 ml/100 g	50 (10)	70 (20)	150 (65)	225 (110)
SAW, FCAW, GMAW, SMAW ^{d, e, f}	8 ml/100 g	50 (10)	125 (50)	175 (80)	225 (110)
SAW, SMAW of HPS 70W to lower strength grades of steel ^f					

^a If satisfactory results are not achieved with the above minimum preheat and interpass temperatures during development of the Welding Procedure Specification (WPS), and an increased preheat temperature is used to provide a satisfactory Procedure Qualification Record (PQR), the higher preheat temperature should be the required minimum during bridge fabrication.

^b The minimum preheat or interpass temperature required for a joint composed of different base metals and/or thicknesses should be based on the higher of the minimum preheat required by AWS D1.5, Table 4.4 or Table 3 above.

^c Diffusible hydrogen of filler metal tested by manufacturer shall not exceed a H₄ classification. Heat input should be limited as indicated in Section 3.5.

^d Refer to AWS D1.5, Sections 12.5, 12.6 and 12.7 for handling requirements. Manufacturer's recommendations must be followed as a minimum.

^e Pulsed GMAW shall not be allowed.

^f Conforms to AWS D1.5, Table 4.4 for higher grades.

Tiré de « Guide Specification For Highway Bridge Fabrication
with HPS 70W (HPS 485W) Steel »

**Température minimum de préchauffage et de maintien entre les
passes de soudure lors du soudage de l'acier ASTM A709 HPS 485W**

Tableau 2

**PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES ET GÉOMÉTRIQUES DES ARMATURES
EN POLYMÈRE RENFORCÉ DE FIBRES DE VERRE**

Armatures en matériaux composites de type V-Rod fabriquées par la compagnie Pultrall

Composition : ± 75 % Fibres de verre
 ± 25 % Matrice constituée d'une résine vinylester modifiée

Désignation de la barre	Diamètre (mm)	Aire (mm ²)	Poids linéaires (kg/m)	Module d'élasticité (MPa)	Résistance spécifiée en traction garantie * (MPa)
# 5	15,9	200	0,398	46 000 min.	683 min.
# 6	19,1	285	0,602	46 000 min.	656 min.

* Valeur correspondant à la valeur moyenne des résultats des essais effectués sur un échantillonnage donné, de laquelle on soustrait la valeur de l'écart type obtenue multipliée par trois.

**Propriétés mécaniques et géométriques des armatures
en polymère renforcé de fibres de verre**

Tableau 3

ANALYSE ÉCONOMIQUE COMPARATIVE POUR UNE PÉRIODE DE 150 ANS		
	Pont de 150 ans [\$ 2004] (Estimation)	Pont conventionnel 2004 [\$ 2004] (Estimation)
Coûts totaux	2 996 651 (+ 1,9 %)	2 941 349
Coûts par intervenant		
Ministère des Transports	2 446 395 (+ 3,3 %)	2 367 997
Usagers	550 256	573 353
Coûts par intervention		
Construction initiale	2 806 032	2 560 026
Entretien, réparation et reconstruction du pont conventionnel	190 619	381 323
Coûts par élément		
Dalle	532 679	444 660
Superstructure	496 522	450 704
Unités de fondation	293 053	370 009
Autres (structure)	345 958	316 941
Chantier (structure)	155 000	160 660
Autres *	1 173 438	1 198 376

* Inclut les approches du pont, le chemin de déviation, la remise en état des lieux, le revêtement de la chaussée, le maintien de la circulation et la signalisation.

Analyse économique comparative pour une période de 150 ans

Tableau 4

ÉTUDE COMPARATIVE – COÛTS DE CONSTRUCTION INITIAUX			
	Pont de 150 ans [\$] (Estimation)	Pont conventionnel 2004 [\$] (Estimation)	Pont de Val-Alain [\$] (Soumission)
Coûts totaux	2 315 536 (+ 11,9 %)	2 069 529	2 087 112
Coûts par élément			
<u>Pont</u>			
Dalle	363 119	220 319	382 820
Superstructure	496 522	413 592	433 752
Unités de fondation	271 995	314 417	233 825
Autres (structure)	345 958	283 260	283 432
Chantier (structure)	155 000	155 000	266 027
Total pont	1 632 594 (+ 17,7 %)	1 386 588	1 599 856
<u>Autres *</u>	682 942	682 942	487 256
Coûts particuliers			
Acier de charpente	496 522** (+ 20,1 %)	413 592***	433 752***
Armatures pour le tablier	179 837 (+ 92,4 %)	93 468	196 511
Joint de dilatation et d'étanchéité	69 498 (+ 548 %)	10 720	36 123

* Inclut les approches du pont, le chemin de déviation, la remise en état des lieux, le revêtement de la chaussée, le maintien de la circulation et la signalisation.

** Acier HPS.

*** Acier 350 AT.

Étude comparative – Coûts de construction initiaux

Tableau 5