

Renforcement par précontrainte extérieure à l'aide de câbles monotorons galvanisés au pont Champlain

Juan Echague¹, Frédéric Légeron², Nicolas Sansoucy³

¹La Société des ponts Jacques Cartier et Champlain Inc.

²Consultant pour AECOM

³AECOM Consultants Inc.

Sommaire:Le pont Champlain a été construit en 1962 et il est l'un des ponts les plus stratégiques de la région de Montréal. Environ 60 millions de véhicules le traversent chaque année. Un programme spécial d'investissement de 10 ans et 249M\$ pour le maintien et la réparation du pont est présentement en cours. Dans le cadre de ce programme spécial d'entretien, une technique innovatrice de réparation a été développée pour renforcer les poutres de rive du tablier, à l'endroit des travées qui ont un faible gabarit d'hauteur sous le tablier. Le choix de renforcement a été d'utiliser des câbles monotorons galvanisés pour la précontrainte extérieure, de façon à faciliter le retensionnement et le remplacement de la précontrainte ajoutée. Des ancrages de monotorons externes ont été utilisés afin de minimiser la démolition de béton et les dommages à la précontrainte interne des poutres existantes. Les ancrages ont été testés selon la norme CSA S6-06, Code Canadien sur le calcul des ponts routiers. Des déviateurs en acier galvanisé ont été utilisés pour donner le profil requis aux câbles au droit des diaphragmes intermédiaires, lesquels ont été aussi renforcés pour éviter des charges débalancées faisant suite à la nouvelle précontrainte appliquée aux poutres. Les dalles, qui montrait aussi des signes d'endommagement, ont été renforcées avec des monotorons gainés graissés qui supportent la dalles par des déviateurs en plus de la mettre en compression. Les opérations de mise en tension de la précontrainte seront suivies à l'aide de capteurs en fibre optique collés à la surface du béton et de capteurs élasto-magnétiques qui mesurent les forces réelles des câbles.

1. Conception et description du type de renforcement des poutres longitudinales

Parmi les techniques de réfection principales utilisées pour les poutres de rive des travées d'approche du pont Champlain, des arbalètes à deux poinçons (ou *Queen Post*) ont été utilisées avec succès ces dernières années. Il s'agit de précontrainte extérieure avec des barres à haute résistance et des poinçons en acier galvanisé (voir photo 1) qui supportent le tablier et ajoute une résistance aux travées endommagées. Cependant, ce système ne peut être utilisé que sur des travées ayant un gabarit d'hauteur suffisant pour la mise en place des poinçons (voir photo 2). Il a été nécessaire de concevoir un nouveau système de renforcement qui puisse être mis en place sous le tablier dans les travées à faible tirant d'air. Cette exigence a été décrite dans les Termes de Référence du contrat d'ingénierie en cours. En plus, des exigences liées à la remise en tension et la possibilité de remplacement de la précontrainte ont été aussi incluses aux Termes de Référence, pour prendre en compte la dégradation continue de la structure et faciliter les opérations futures. Enfin, le renforcement prend en compte l'horizon de vie du pont Champlain jusqu'à son remplacement.

Les travées d'approche du pont Champlain sont constituées de trois sections : les sections 5 et 7A, avec deux diaphragmes intermédiaires faisant la presque totalité de la hauteur des poutres, et la section 7B qui présente une autre configuration de tablier avec cinq diaphragmes élancés. La plupart des poutres intérieures montrent peu ou pas de signes de détérioration ou endommagement, ce qui n'est pas le cas de la majorité des poutres extérieures ou de rive, qui montrent des traces de corrosion des câbles de précontrainte et du délaminage du béton. Dans le passé, le renforcement actif des poutres consistait en l'ajout de câbles de post-tension rectilignes de chaque côté des poutres de rive, et le nombre de torons à ajouter dépendait du nombre de câbles internes perdus lors de la progression de la corrosion. Cependant, cette méthode n'ajoutait que très peu de capacité additionnelle en cisaillement, et des barres précontraintes ont été ajoutées comme étriers externes. Malgré que la méthode du *Queen Post* était intéressante car elle donnait en même temps une capacité additionnelle en flexion et en cisaillement aux poutres, il était nécessaire de modifier ce système pour permettre sa mise en place sous des travées à faible gabarit de hauteur. La solution la plus simple était de réduire l'excentricité des barres du *Queen Post*, mais pour maintenir le même niveau d'efficacité il était nécessaire d'augmenter la force de précontrainte.



Photo 1 – Renforcement du type arbalète ou *Queen Post*

Photo 2 – Exemple de travée du pont ayant un faible gabarit en dessous du tablier

La force de précontrainte nécessaire est déterminée en fonction du nombre de câbles internes perdus à cause de la corrosion, la résistance à la compression du béton des diaphragmes et la précontrainte horizontale existante ou non sur les poutres de rive. Au début du projet, les estimations préliminaires préconisaient une valeur maximale de 5 à 6 MN par poutre pour les sections 5 et 7A, et 3 MN pour la section 7B. Ces valeurs ont été déterminées d'après une évaluation du nombre de câbles perdus et de l'expérience et la connaissance du pont Champlain de la part de l'équipe du projet. L'ajout de post-tension par le système *Queen Post* crée une redistribution des charges, qui sont reprises par les diaphragmes intermédiaires et les poutres de rive. Ce sont précisément ces deux facteurs, la capacité en cisaillement des diaphragmes et la contrainte maximale de la fibre inférieure des poutres de rive, qui limitent la charge maximale de tout système de renforcement actif sur les poutres de rive. En plus, la conception devait prendre en compte la progression de la corrosion interne des câbles, de manière à octroyer une surcapacité des poutres de manière préventive. Un autre défi de conception était la répartition des efforts d'ancrage de la précontrainte : i) étant donné la faible excentricité du renforcement, la force d'ancrage à transmettre aux âmes des poutres était très élevée, en considérant que les

âmesont déjà la précontrainte interne et très peu de ferrailage passif ; ii) il n’y avait pas d’espace pour la mise en tension des câbles avec de gros vérins placés derrière les ancrages, et, dans ce cas, la position des ancrages n’aurait pas pu être près de la zone d’extrémité, où le cisaillement vertical est maximum. Plusieurs options ont été étudiées et, basé sur quelques projets similaires de renforcement de structures en Australie, une solution utilisant des câbles monotorons avec des ancrages plats a été développée. Pour les sections 5 et 7A, 16 paires de câbles par poutre ont été utilisées; pour la section 7B, 8 paires de câbles ont été utilisées. Cette méthode permet de mieux répartir les forces d’ancrage de la précontrainte (voir Fig. 3 pour une élévation dans la section 5). En plus, l’utilisation de l’ancrage monotoron permet de rapprocher le point d’application de la force très près de l’extrémité de la poutre. Pendant les opérations de mise en tension, un tuyau à 45 degrés est utilisé pour placer le vérin derrière l’ancrage et ainsi permettre la mise en tension du câble dans un espace restreint.

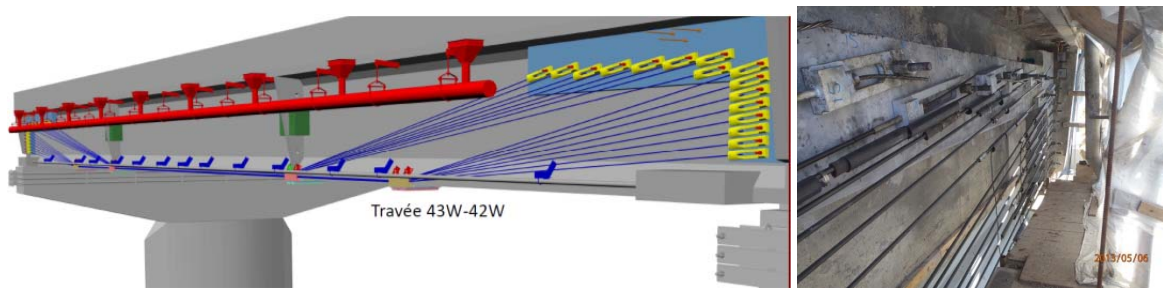


Fig. 3 – Renforcement extérieure avec des câbles monotorons (section 5)

Pour donner aux câbles le profil requis, des déviateurs métalliques en acier galvanisé ont été conçus (quatre déviateurs pour les sections 5 et 7A, deux pour la section 7B). Le bloc d’ancrage en béton est suffisamment large pour permettre un tracé des câbles avec déviation seulement dans le plan vertical. Pour les sections 5 et 7A, les déviateurs ont été positionnés entre les faces latérales des poutres et les gaines de la précontrainte horizontale existante. Cette contrainte géométrique a été étudiée avec soin car le calcul des déviateurs a été contrôlé par cet aspect, qui en plus est critique pour le respect du gabarit routier en dessous du tablier. Pour la section 7B, les contraintes de gabarit en dessous des poutres ont été moins sévères, alors les câbles monotorons ont été placés à l’extérieur de la précontrainte horizontale existante, pour faciliter leur mise en place. La déviation des câbles monotorons doit prendre en compte un compromis entre un faible rayon de courbure d’environ 1 à 2 m, donc une augmentation des contraintes locales au niveau des déviateurs et une longueur réduite de déviateur, et un rayon de courbure plus important (3 m) qui diminue les contraintes locales mais engendre une longueur plus importante de déviateur. Le choix a été de prévoir un rayon de courbure de 3m pour minimiser la pression de contact au niveau des gaines des câbles monotorons. La littérature spécialisée montre qu’en ayant un minimum de 3m de courbure, il n’y aura pas de déchirement de la gaine. Le déviateur est constitué de plaques courbes soudées aux plaques épaisses (sections 5 et 7A) ou aux profilés W (section 7B), qui à la fois transmettent les efforts verticaux aux poutres. La tolérance d’installation des câbles est de 1 degré dans chaque direction. Les déviateurs ont dû être dimensionnés en conséquence et la procédure d’installation exige que cette tolérance soit respectée durant la construction.

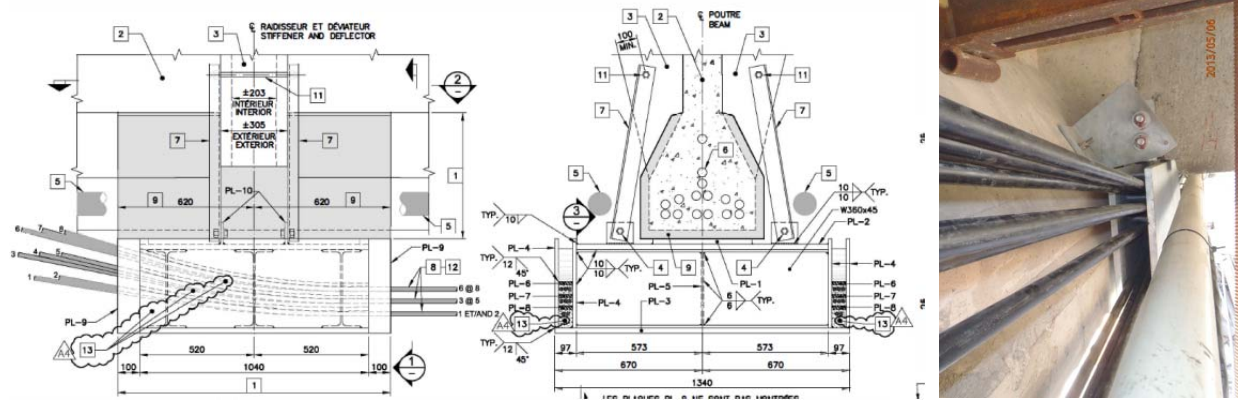


Fig. 4– Plaques des déviateurs métalliques ; on note le coulis de remplissage pour protéger les câbles monotorons (section 7B)

2. Renforcement des dalles des approches

Les dalles des approches du pont Champlain sont constituées des semelles supérieures des poutres préfabriquées et de dalles intercalaires coulées en place entre ces mêmes semelles supérieures des poutres. Les semelles supérieures ont une largeur de 1.75m et les dalles intercalaires ont une largeur de 1.97m entre les semelles supérieures. La dalle est mise en précontrainte de 2 MPa transversalement par des câbles de précontrainte espacés à tous les mètres. Lors des inspections de 2011, des délaminations à l'intrados de la dalle et des taches de rouilles ont conduit à se questionner sur l'impact de la perte des câbles transversaux. Pour cela, considérant la complexité de la structure, un modèle par éléments finis a permis d'évaluer l'effet de la réduction de la précontrainte transversale suite à la détérioration des câbles transversaux. Le modèle incorporait toute la précontrainte longitudinale et transversale et est présenté à la figure 5. Des modèles simplifiés à grillage de poutre et une approche de dalle bidirectionnelle avec les abaques de Pucher ont aussi été mis en place à des fins de comparaison. Dans le modèle d'éléments finis, 2 zones ont été étudiées en particulier, soit la zone centrale (mi-travée), et une zone d'extrémité (près des diaphragmes d'extrémité). Suite à cette analyse, il est apparu que la perte de précontrainte pouvait conduire à terme à une réduction significative du facteur de capacité de surcharge, et une méthode corrective proactive a été proposée, dans laquelle tout câble perdu serait remplacé par trois monotorons gainés graissés passant sous la dalle et ancrés sur chaque poutre de rive. Cette réparation était dimensionnée pour le cas le plus défavorable, soit la détérioration dans la zone centrale. Le système de déviation est installé sous les endroits endommagés qui sont généralement entre la poutre de rive et la première poutre adjacente (voir figure 6). Ces déviations permettaient un support additionnel à la dalle dans le cas où d'autres câbles contigus s'endommageraient.

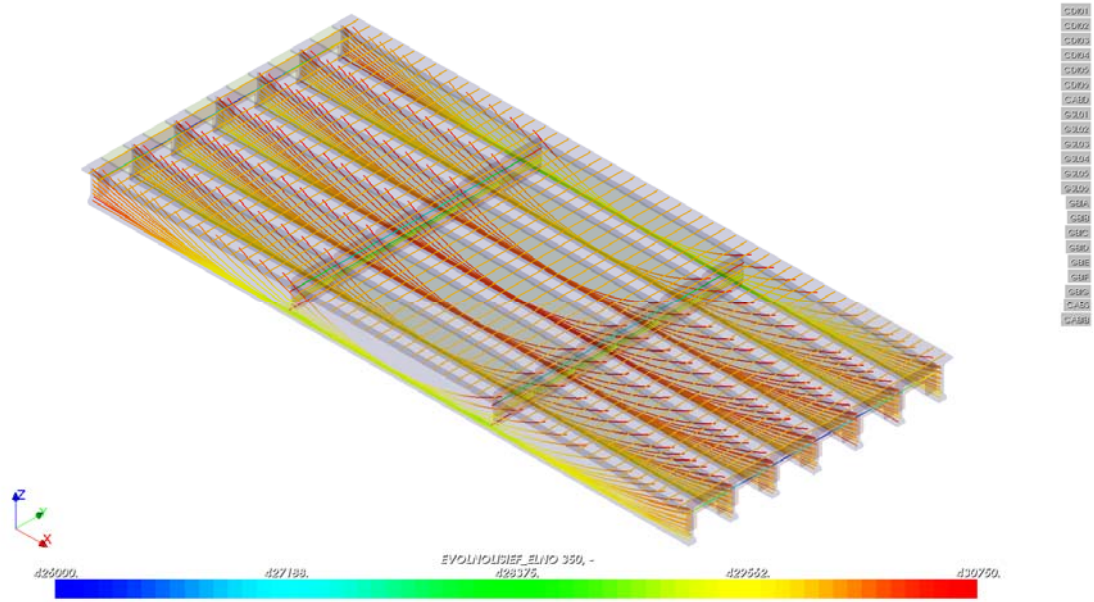


Figure 5. Modèle par élément fini d'une travée.

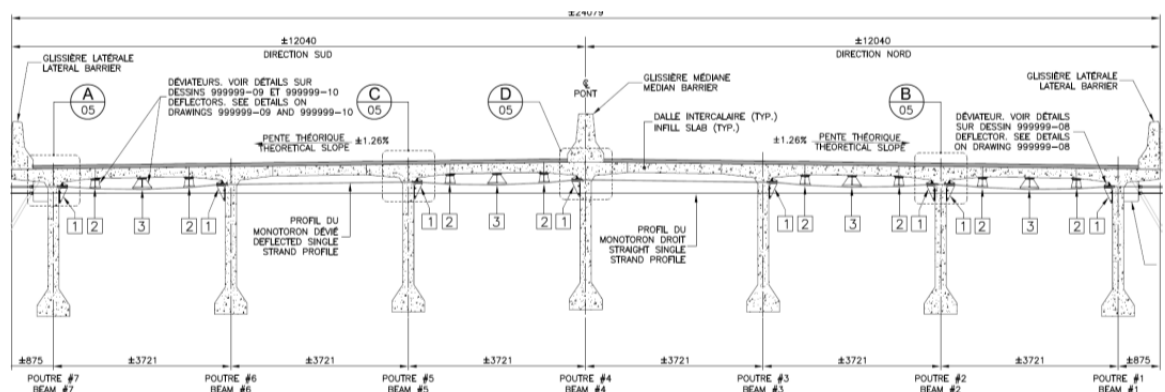


Figure 6. Renforcement de la dalle par système de précontrainte transversal

3. Durabilité et contrôle de la corrosion pour le système de renforcement des poutres

Le système de protection des câbles monotorons a été conçu pour assurer une durée de vie en service d'au moins 10 ans. Les câbles sont galvanisés, gainés et graissés pour permettre un niveau de protection contre la corrosion similaire à celui des arbalètes avec des barres précontraintes. En plus, le retensionnement des câbles est une condition nécessaire pour prendre en compte l'évolution des dommages aux poutres et les effets à long terme, tel que le retrait et le fluage des poutres. Ces derniers effets sont difficiles à prédire dans un contexte de réparations avec la précontrainte et de détérioration due à la corrosion. Les gaines et la graisse des monotorons devront assurer une protection à la corrosion d'au moins 10 ans, tant que la gaine n'est pas endommagée. La gaine est conçue spécialement pour l'utilisation dans les intempéries, ayant une épaisseur de 1.5 mm et résistante aux rayons UV. La durabilité a été largement débattue par l'équipe de conception et le Propriétaire. Il y avait quatre aspects à considérer : i) détérioration de la gaine par l'attaque chimique des sels de déglacage ; ii) déchirement de la

gaine par la chute d'objets, tel que la glace; iii) vibration des câbles à cause du trafic ou du vent :les câbles pourraient se frapper entre eux, contre les poutres ou contre l'équipement suspendu du tablier, ce qui peut entraîner des dommages aux gaines ; iv) des dommages induits pendant le montage et la mise en place des câbles et déviateurs.

Pour compenser le risque associé aux dommages induits pendant le processus de montage des câbles, une inspection accrue est nécessaire à toutes les étapes de construction. Néanmoins, l'intérieur des déviateurs est une zone d'accès très difficile, rendant l'inspection très complexe. Pour cette raison, l'intérieur des déviateurs a été rempli de coulis pour assurer une bonne pression de contact entre la gaine et la surface d'acier, et ainsi améliorer la durabilité du système. Pour contrôler la vibration des câbles, un système anti-vibration a été développé. La principale difficulté était la prise en compte du non-alignement dans un même plan vertical de la nappe des câbles, malgré les strictes tolérances d'installation. En conséquence, un amortisseur de vibrations composé de profilés d'acier et de caoutchouc liquide injecté de type Poly 74-55 est installé une fois les câbles tendus. Une fois durcie, le caoutchouc permet une certaine flexibilité et la force de contact entre la gaine et la surface d'appui est diminuée. Malgré tout, il était difficile de contrôler le risque d'attaque chimique et de déchirement de la gaine dû à la chute d'objets provenant du tablier du pont. La gaine peut résister à des forces équivalentes à un bloc de glace de 5 kg qui tombe d'une hauteur d'environ 1 m (comme le cas d'un bloc de glace qui tombe du dessus d'une glissière du pont), tant que les bords du bloc de glace ne sont pas tranchants. Étant donné le faible risque assumé, il a été assumé que seulement quelques monotorons failliraient pendant la durée de vie en service de 10 ans. De même, dans la plupart des cas, la tension dans les monotorons est de 0.4 ou 0.5 fpu, qui représente un niveau où la corrosion sous tension est moins critique. Comme le système est redondant de façon inhérente, et comme il apporte plus d'efforts que strictement nécessaire dans la plupart des cas, le risque a été assumé acceptable pour une durée d'au moins dix ans. Considérant tous les risques précédents et même si plusieurs mesures de mitigation étaient mises en œuvre, considérant l'importance du pont et la faible augmentation de coût de torons galvanisés par rapport à des torons non galvanisés, un système de monotorons galvanisés, graissés et gainés a été sélectionné. Des câbles monotorons galvanisés sont fréquemment utilisés dans les haubans des ponts haubanés, et ce même type a été spécifié pour le projet. Il est attendu que le système de renforcement avec des câbles galvanisés, gainés et graissés aura un horizon de vie bien supérieur à 10 ans. Pour des raisons similaires, les monotorons de renforcement des dalles ont aussi été galvanisés.

4. Instrumentation du système de renforcement des poutres

Le système est instrumenté pour investiguer les déformations des poutres de béton et de la précontrainte extérieure, et faire une comparaison entre le comportement réel du système et le calcul théorique. Deux techniques d'instrumentation sont appliquées en parallèle : i) des extensomètres de fibre optique pour caper les déformations des âmes des poutres en temps réel. L'efficacité du système et le gain de compression des âmes sont mesurés ; les contraintes de compression induites par le système ont une incidence directe sur la capacité en cisaillement des poutres ; ii) des capteurs élasto-magnétiques sur les câbles monotorons pour mesurer les pertes instantanées réelles. Les pertes instantanées sont dues principalement à la friction entre le câble et le déviateur, et la déformation du déviateur par la force des câbles. Cette dernière est une

déformation non simultanée difficile à estimer, en particulier pour les déviateurs des sections 5 et 7A qui sont très flexibles, d'où l'importance d'avoir un suivi par instrumentation pour confirmer l'efficacité du système. Il y aura également des pertes dues à la non-simultanéité de mise en tension des monotorons.

5. Conclusions

L'utilisation de câbles monotorons comme précontrainte extérieure est plutôt habituelle dans l'industrie du bâtiment, mais peu usuelle pour les ouvrages d'art, étant donné l'environnement agressif auquel les structures sont soumises. Cependant, ce cas en particulier démontre que la solution avec des câbles monotorons est possible si certains aspects sont bien pris en compte. Il s'agit d'une solution très flexible qui offre plusieurs avantages par rapport à une précontrainte externe multi-torons classique. Dans ce cas, l'exigence de renforcer des travées au-dessus de voies et ayant un faible gabarit routier, et la faible capacité du béton des âmes nous ont menés à choisir des câbles monotorons. L'attaque chimique due essentiellement aux sels de déglacage utilisés pour le déneigement des voies a été pris en compte et plusieurs mesures ont été mises en place, comme le remplissage d'une portion des déviateurs avec du coulis, l'ajout d'amortisseurs de vibrations et la spécification de trois barrières anticorrosion avec des câbles galvanisés, gainés et graissés. Une attention spéciale doit être portée aux pertes instantanées. Ainsi, l'instrumentation sera utilisée tant sur les poutres de béton que sur les monotorons afin de valider l'efficacité du système de renforcement.

Finalement, la conception de ce système de renforcement est un bel exemple de collaboration entre les firmes d'ingénierie, les entrepreneurs et le Propriétaire de l'ouvrage. Pour développer des techniques innovatrices dans le domaine de la réfection des structures, il est essentiel que tous les intervenants soient impliqués dès l'étape de conception de façon à prendre en considération tous les aspects clés qui affectent l'efficacité de la solution, tels que la durabilité, la faisabilité, la fiabilité structurale, la capacité et le cycle de vie de l'ouvrage.

6. Remerciements

Les auteurs remercient sincèrement l'équipe d'ingénieurs et techniciens des services de l'Ingénierie et Construction de la Société des ponts Jacques Cartier et Champlain Inc., ainsi que la firme AECOM, pour leurs collaboration et conseils pendant le développement de ce projet.