

# RENFORCEMENT DE POUTRES À ÂME PLEINE AU MOYEN DE BARRES DE PRÉCONTRAÎNTE – CAS DES VIADUCS DU BOULEVARD LAJEUNESSE

Bernard Pilon, ing. M.Sc.  
Direction des structures  
Ministère des Transports du Québec

## Résumé

Les viaducs du boulevard Lajeunesse supportent les voies de l'autoroute 15 au-dessus du boulevard Lajeunesse et sont constitués de deux poutres à âme pleine non composites avec la dalle de béton. Ces poutres présentaient des déficiences de capacité en cisaillement et la Direction des Laurentides-Lanaudière a fait appel au Service de l'entretien de la Direction des structures afin de trouver un moyen de renforcement temporaire visant à prolonger la durée de vie des ponts pour quelques années sans avoir à procéder à un affichage.

Un renfort au moyen de barres d'acier à haute résistance reliées aux poutres par des sabots d'acier a été proposé afin de réaliser rapidement les travaux de renforcement et ce, au moindre coût possible. Prévus au départ pour être réalisés à l'intérieur de deux fins de semaine, les renforts d'un des deux ponts ont été réalisés en six semaines au cours de l'hiver 2004-2005. Les travaux au second pont sont prévus à l'été de 2006 et seront réalisés de façon similaire.

## Introduction

Situés sur l'autoroute 15 dans la ville de Saint-Jérôme, les deux viaducs du boulevard Lajeunesse portent les trois voies de l'autoroute en direction Nord et Sud au-dessus du boulevard du même nom et d'une voie ferrée. Les ponts comportent cinq travées continues et sont constitués de deux poutres à âme pleine supportant une dalle en béton par l'intermédiaire d'entretoises. Ces ponts ont été parmi les derniers ouvrages d'art assemblés au moyen de rivets et ont été construits en 1959. La figure 1 montre les ponts.



Figure 1 – Vue d'ensemble

Au début des années 2000, une évaluation de la capacité portante de ces ponts a été réalisée par la Direction des structures pour le compte de la Direction des Laurentides-Lanaudière. Cette évaluation a permis de constater que les structures avaient une capacité de résistance à la flexion suffisante. Par contre, ces mêmes calculs ont démontré une importante faiblesse en cisaillement des poutres d'acier au droit des piles. Bien que l'inspection n'ait révélé aucun défaut, une correction devait être apportée rapidement aux structures étant donné le trafic routier important y circulant.

## **Problématique**

Sur une longueur de deux fois 20 mètres, c'est-à-dire un peu moins du tiers de leur longueur, les poutres des deux structures présentaient un manque de capacité en cisaillement. Il est généralement assez facile de renforcer des ponts en acier pour augmenter leur résistance à la flexion mais il peut en être tout autrement dans le cas des charges de cisaillement. Il est toujours possible d'ajouter des raidisseurs sur l'âme des poutres, augmentant ainsi la résistance au voilement de celle-ci et donc la résistance des poutres. Cette solution a toutefois une limite puisqu'une fois les possibilités de voilement éliminées, l'âme demeure avec une capacité «ultime» déterminée par la résistance de l'acier qui la compose. Une fois cette limite atteinte, les possibilités de renforcement deviennent plus complexes.

Les viaducs du boulevard Lajeunesse se situaient dans cette dernière catégorie. Même en développant la pleine capacité de l'âme par l'ajout de raidisseurs, les poutres demeuraient faibles. Comme il était impensable de procéder à l'affichage de ces ponts qui, rappelons-le, supportent une des principales autoroutes du Québec, une solution de renfort ou un remplacement allait devoir être prévu. C'est ce mandat d'étude qui a été confié à la Section entretien de la Direction des structures par la Direction des Laurentides-Lanaudière en 2003.

## **Solution : le renfort par précontrainte**

Très tôt dans l'étude du renforcement possible, les solutions d'ajout de plaques sur les âmes ont été mises à l'écart. D'autres options comme l'ajout d'une poutre supplémentaire ont aussi été brièvement envisagées puis abandonnées en raison du coût prohibitif et des difficultés de réalisation.

Un renfort des poutres au moyen de barres d'acier à haute résistance a alors été proposé. Cette solution consistait à se servir d'acier de précontrainte afin de produire dans l'âme des poutres des contraintes contraires à celles produites par les efforts qui sollicitent la poutre.

Lorsque des poutres sont soumises à des sollicitations, il se crée des efforts de tension et de compression, principalement reprises par les ailes, et des contraintes de cisaillement dans l'âme. Les contraintes normales principales de cisaillement sont orientées à 45 degrés dans l'âme de la poutre au niveau de l'axe neutre. Les poutres à âme pleine des ponts sont également, la plupart du temps, pourvues de raidisseurs. Ces pièces d'acier perpendiculaires à l'âme servent à empêcher le voilement de cette dernière. Ils servent aussi au développement du «champ de tension», une force de tension qui se développe suivant la diagonale dans les panneaux de raidisseurs une fois le voilement de l'âme amorcé, un panneau étant la zone comprise entre deux raidisseurs. La figure 2 en présente une vue schématique.

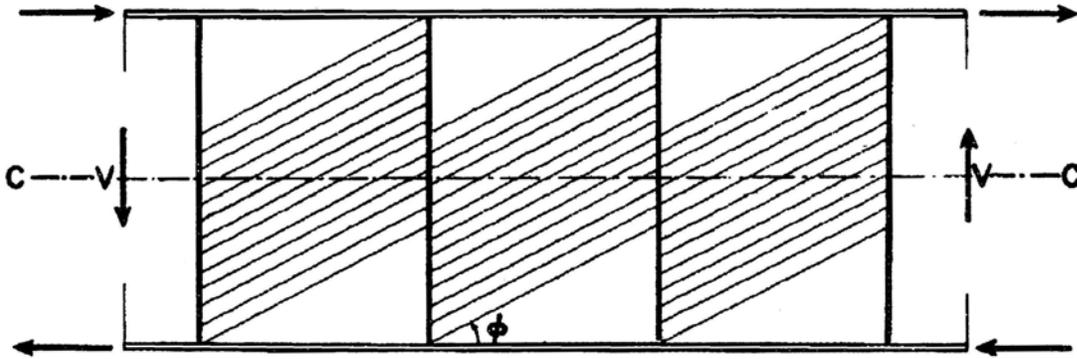


Figure 2 – Champ de tension

Le principe du renfort par précontrainte consiste donc en quelque sorte à venir soulager les contraintes de cisaillement et les contraintes de tension associées au champ de tension agissant de façon diagonale dans les panneaux de raidisseur de manière à ce que les poutres puissent reprendre plus d'efforts en cisaillement. Les barres de précontrainte se trouvent alors à reprendre une partie de ces efforts. Lorsque plusieurs barres sont utilisées en série sur la poutre, il est possible de faire cheminer les efforts de cisaillement jusqu'aux appuis, soulageant ainsi la poutre sur des longueurs qui peuvent aller sur plusieurs mètres. C'est ce principe qu'utilisent les poutres triangulées de type Pratt avec les diagonales en tension et les poteaux en compression.

### Conception des renforts

Les efforts de cisaillement s'appliquant sur les poutres étaient connus suite à l'évaluation de la capacité portante de ces dernières. Un modèle informatique des poutres avait alors été créé. Restait alors à intégrer au modèle les renforts proposés. Pour ce faire, le troisième principe de la précontrainte, c'est-à-dire le principe des charges équivalentes, est utilisé. Selon ce principe, on peut remplacer des barres ou des câbles de précontrainte dans une structure par les effets qu'ils créent dans cette dernière. Nous avons alors affaire à des efforts dits «internes», par opposition aux efforts «externes», car ceux-ci sont engendrés par la précontrainte et se contrebalancent dans la structure (ne produisent pas d'efforts supplémentaires sur les appareils d'appui).

À la suite d'un processus d'essais et d'erreurs avec le modèle, des renforts avec trois types de barres ont été conçus. Des barres d'acier à haute résistance de nuance 1 030 MPa de 32 mm, 36 mm et 46 mm de diamètre ont été employées. Les figures 3 et 4 montrent les enveloppes de cisaillement obtenues avec le modèle informatique avant et après l'application des renforts.

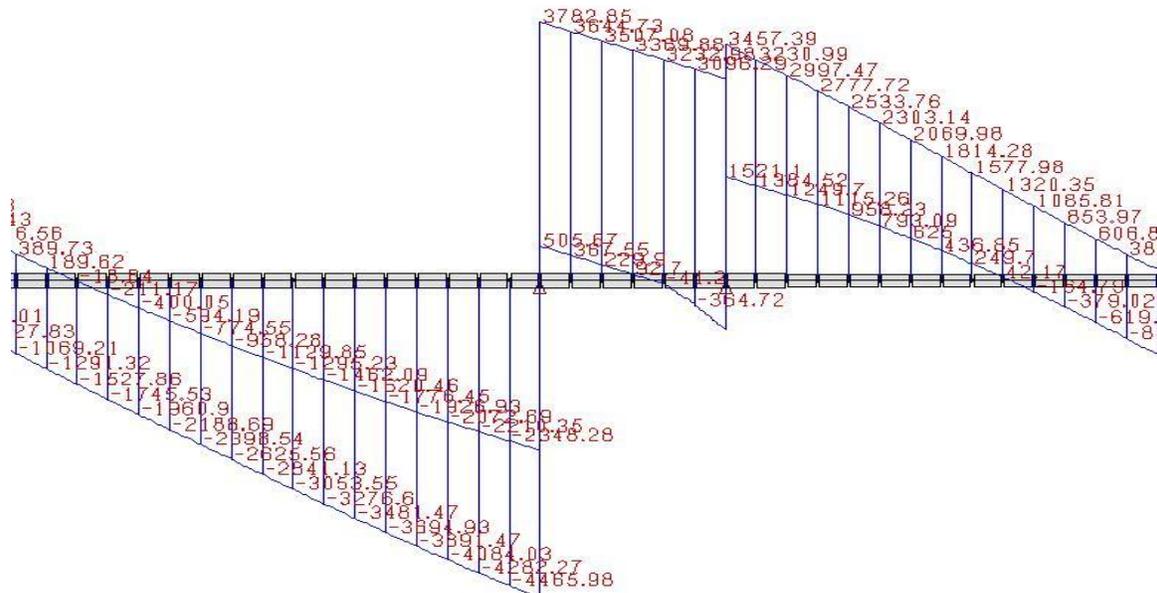


Figure 3 – Enveloppe des efforts de cisaillement avant renforts

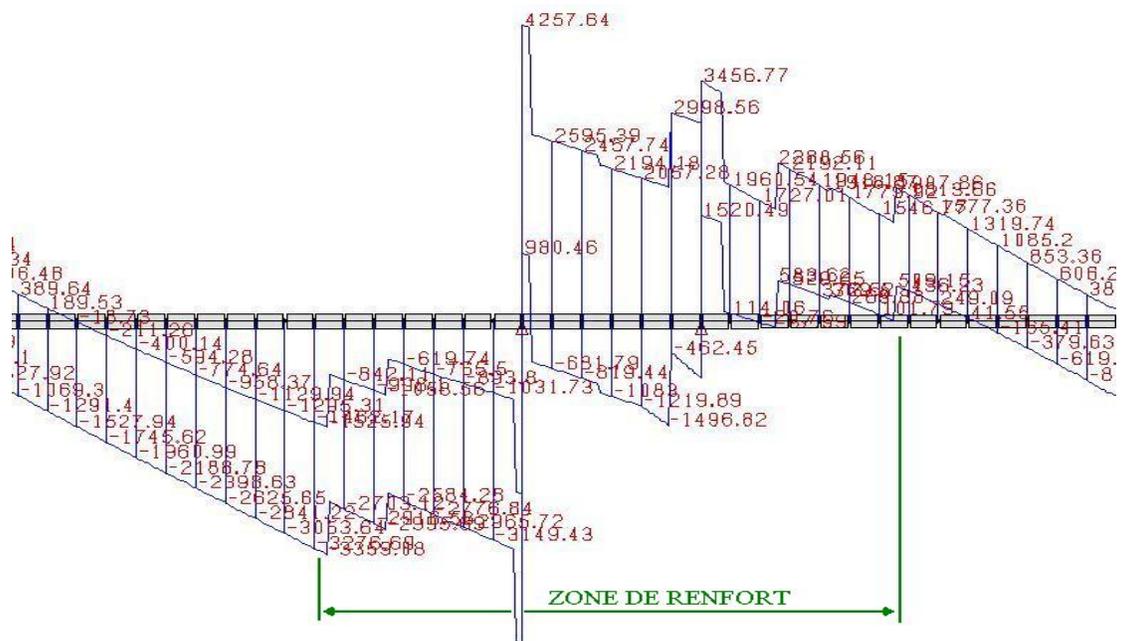


Figure 4 – Enveloppe des efforts de cisaillement après renforts

On constate à l'examen de la figure 4 que l'enveloppe des efforts a diminué dans la zone des renforts sauf à deux endroits où ils ont augmenté localement, c'est-à-dire à proximité des appuis. Ces efforts supplémentaires sont dus à la discontinuité des barres de renforcement au-dessus des appuis, les barres étant disposées de part et d'autre de ceux-ci (aucune barre ne traverse les zones où sont situés les raidisseurs d'appui). Les efforts sont majorés dans ces zones à cause des effets de la précontrainte. Ces efforts ne sont pas problématiques puisqu'ils sont situés directement au-dessus des plaques d'appui des appareils et donc dans une zone qui comporte de nombreux raidisseurs d'appui de grande épaisseur. La poutre est donc en mesure de supporter localement de tels efforts.

Afin de pouvoir installer les barres selon une inclinaison qui permettrait de reprendre des efforts de cisaillement, des sabots d'acier ont été prévus contre la semelle supérieure et inférieure des poutres. Ces sabots servent non seulement à aligner les barres de renfort mais également à les retenir sur les poutres et à les empêcher de glisser contre les semelles car la mise en tension des barres inclinées génère des efforts longitudinaux assez importants aux semelles. Afin de retenir les barres et les sabots longitudinalement, ces derniers ont été soudés non pas sur les poutres, car ceci aurait eu pour effet de créer des problèmes de fatigue, mais sur les têtes des rivets utilisés pour assembler les plaques de renfort et les cornières constituant les semelles. La figure 5 montre le détail des sabots et des barres de renforcement.

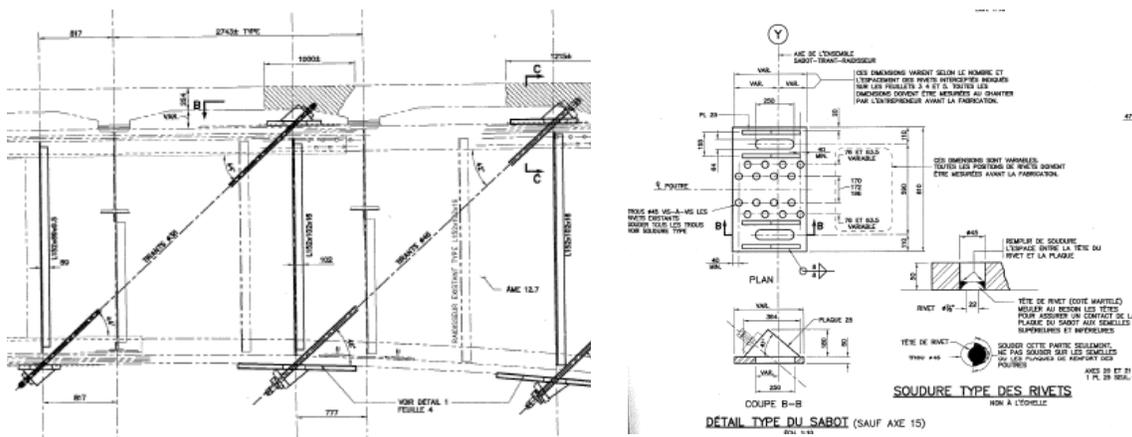


Figure 5 – Sabots et barres de renforcement

Afin de pouvoir installer les sabots sur les semelles supérieures, des ouvertures localisées dans la dalle ont été prévues. Ces ouvertures, au nombre de 28 par pont, mesurent environ un mètre de côté et exposent la semelle supérieure de façon à pouvoir y installer les sabots. Suite aux travaux de fixation des sabots par soudure, les barres de précontrainte sont mises en place et mises sous tension. Les documents contractuels exigent que la mise sous tension s'effectue de part et d'autre de la poutre par incréments de 10 % de la charge finale jusqu'à ce que la contrainte finale de 80 % de l'ultime soit atteinte. Cette exigence a pour but d'éviter la torsion des poutres principales ou des déformations non-voulues. Une fois la mise sous tension complétée, le sabot supérieur et les ancrages de barres sont noyés dans le béton de réparation de la dalle.

Au départ, il était prévu de réaliser la mise en place des barres à l'intérieur de deux fins de semaine de manière à nuire le moins possible au trafic routier. La réparation des ouvertures dans la dalle une fois les sabots installés aurait pu être réalisée au moyen de béton à prise rapide et la précontrainte des barres réalisée par le dessous de la dalle. Suite à une analyse plus poussée du débit de circulation, il a finalement été décidé de procéder à la réparation des ouvertures de manière conventionnelle et de faire la mise en tension des barres par le dessus de la dalle, ce qui facilite grandement ces opérations.

## **Réalisation en chantier**

Les travaux sur le premier des deux viaducs, celui en direction Nord, ont été réalisés au printemps de 2005. Le montant de la soumission acceptée pour ces travaux a été d'environ 450 000 \$. Ces travaux se sont réalisés à l'intérieur d'un délai de 6 semaines. Les travaux sur le second viaduc, celui en direction Sud, sont prévus pour l'été 2006.

L'ensemble des travaux de pose des raidisseurs et de mise en tension des barres se sont bien déroulés. Certains problèmes ont toutefois été rencontrés lors de la pose des sabots sur les semelles des poutres. Les sabots comportaient des trous afin de dégager les têtes de rivets. Comme les têtes de rivets sont la plupart du temps mal alignés, des trous de 45 mm de diamètre avaient été prévus dans les sabots afin de dégager les têtes de rivets qui ont théoriquement un diamètre de 36 mm. Étant donné que les sabots étaient placés du côté où les rivets avaient été martelés en chantier, il avait été prévu de meuler partiellement les têtes des quelques rivets qui ne s'inséreraient pas dans les trous du sabot. Lorsque les premiers sabots ont été installés, il a été rapidement constaté que le désalignement des filets de rivets était tel que chaque sabot devait être fabriqué sur mesure ou percé en chantier. Ces modifications ont évidemment eu un impact sur la rapidité d'exécution des travaux mais n'ont pas altéré la résistance ou la qualité du renforcement. Des mesures ont par ailleurs été prises aux documents contractuels pour la réalisation des travaux au pont direction Sud afin d'aviser les entrepreneurs du mauvais alignement des rivets et ainsi limiter les inconvénients qui en découlent.

Les figures 6 et 7 montrent la pose des sabots en chantier ainsi que l'aspect final des renforts.

## **Conclusion**

L'utilisation de précontrainte pour le renforcement de poutres d'acier n'est pas nouvelle. Les poutres renforcées d'une telle manière le sont cependant généralement pour des efforts de traction ou de flexion. Le projet du boulevard Lajeunesse à Saint-Jérôme montre que le renfort en cisaillement de poutres d'acier est réalisable et ce, à relativement peu de frais. Le comportement à plus long terme des renforts permettra de tirer des conclusions quant à l'application future sur d'autres ponts.

Les renforcements effectués sur le pont direction Nord ont été réalisés depuis maintenant un peu plus d'un an et ne montrent pas de signes de défaillance.



Figure 6 – Pose des renforcements en chantier

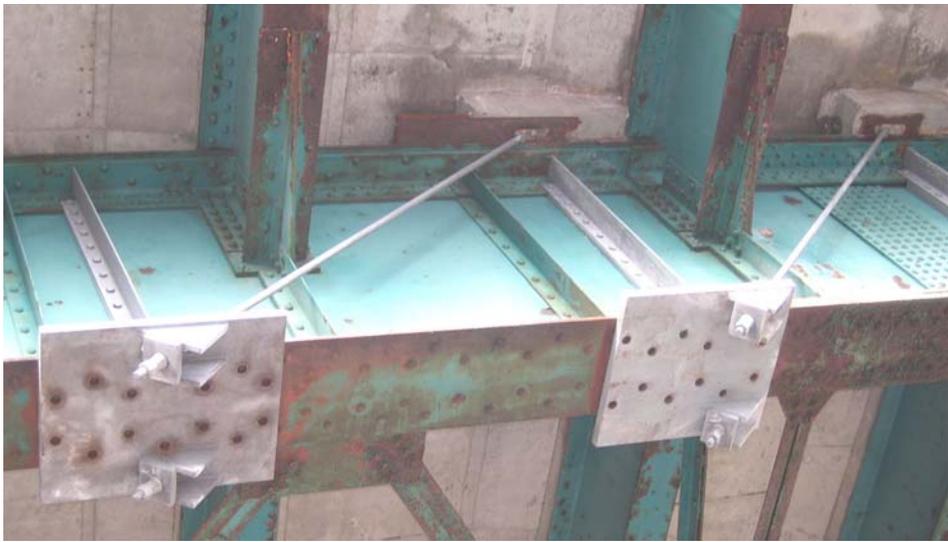


Figure 7 – Aspect final des renforts