

Augmentation de la capacité portante en cisaillement de deux structures situées sur le tournebride du boulevard St-Martin

Alexandre Phan, ingénieur en ponts et ouvrages d'art, SNC-Lavalin inc.

Dominique Bourdages, Coordonnateur structures – Planification et gestion des actifs,
Ville de Laval

Article préparé pour la présentation au Colloque sur la progression de la recherche
québécoise sur les ouvrages d'art 2023 à Québec, QC

Remerciements :

Les auteurs aimeraient remercier les personnes suivantes pour leur grande contribution
au projet présenté :

Ville de Laval : Jean-François Guay, ing., Farid Rahli, ing., Paul Roussy, techn, Luc
Bonneau, techn

SNC-Lavalin : Samir Gouider, ing., Valerian Houdard, ing. et Devon Bowes, techn

Résumé

Situé dans un milieu très urbain, le boulevard Saint-Martin est un axe routier Est-Ouest stratégique pour la Ville de Laval. Deux structures de type dalle épaisse en béton armé permettent aux usagers d'effectuer un demi-tour ou de changer de direction sur le boulevard au niveau de la voie ferrée du CP. Construites en 1970, chaque structure possède deux travées continues de longueur identique de 19,9 m pour une longueur totale de 39,8 m et une largeur hors tout de 11,45 m. Les superstructures de ces ponts comportent deux voies de circulation et un trottoir de 1,5 m. Les fondations sont constituées de culées de type béquille en béton armé et d'une pile centrale en béton.

Des inspections réalisées en 2019 ont démontré la présence de faibles fissures de cisaillement sur les côtés extérieurs de la dalle des deux structures. Des avis de fissuration ont été émis en 2019 et en 2020. Ce type de défauts est critique sur les ponts de type dalle épaisse sans étrier comme dans le cas présent. En 2021, des études de la capacité portante structurale de ces deux ponts ont recommandé d'effectuer des travaux de renforcement en cisaillement sur les deux ponts.

Dû au fait que les fissures de cisaillement sont localisées dans une dalle épaisse, il a fallu concevoir une solution durable permettant d'augmenter la résistance au cisaillement du tablier tout en conservant l'aspect esthétique du pont et en respectant les contraintes de site. De plus, puisque les ponts enjambent à la fois le boulevard Saint-Martin ainsi que la piste cyclable qui le longe, le dégagement vertical à maintenir durant les travaux a motivé le choix d'une intervention par le dessus du tablier. Dans ce contexte, une solution de renforcement par barres d'armature en polymères renforcés de fibres de verre (PRFV) a été élaborée afin de répondre aux objectifs de la réparation. Ce matériau a comme avantage de ne pas être susceptible à la corrosion en plus d'avoir une résistance mécanique élevée et d'être très léger. Même comparées à celles en acier inoxydable, les barres en PRFV sont immunisées aux attaques par l'ion chlorure et celles-ci sont compatibles avec les résines d'ancrages généralement utilisées. Ses propriétés mécaniques montrent également une grande résistance à la traction. De plus, la conception avec ce type d'armature est désormais couverte par le chapitre 16.5 du Code S6-19.

1. Introduction

Le boulevard Saint-Martin est un axe routier Est-Ouest stratégique pour la Ville de Laval. Des deux ponts de conception identique permettent aux usagers d'effectuer un demi-tour ou de changer de direction sur le boulevard au niveau de la voie ferrée du CP. Le pont est (#21138) et le pont ouest (#21061) sont de juridiction municipale alors que la structure centrale pour le train est de juridiction du CP. La Figure 1 montre la localisation des structures concernées.

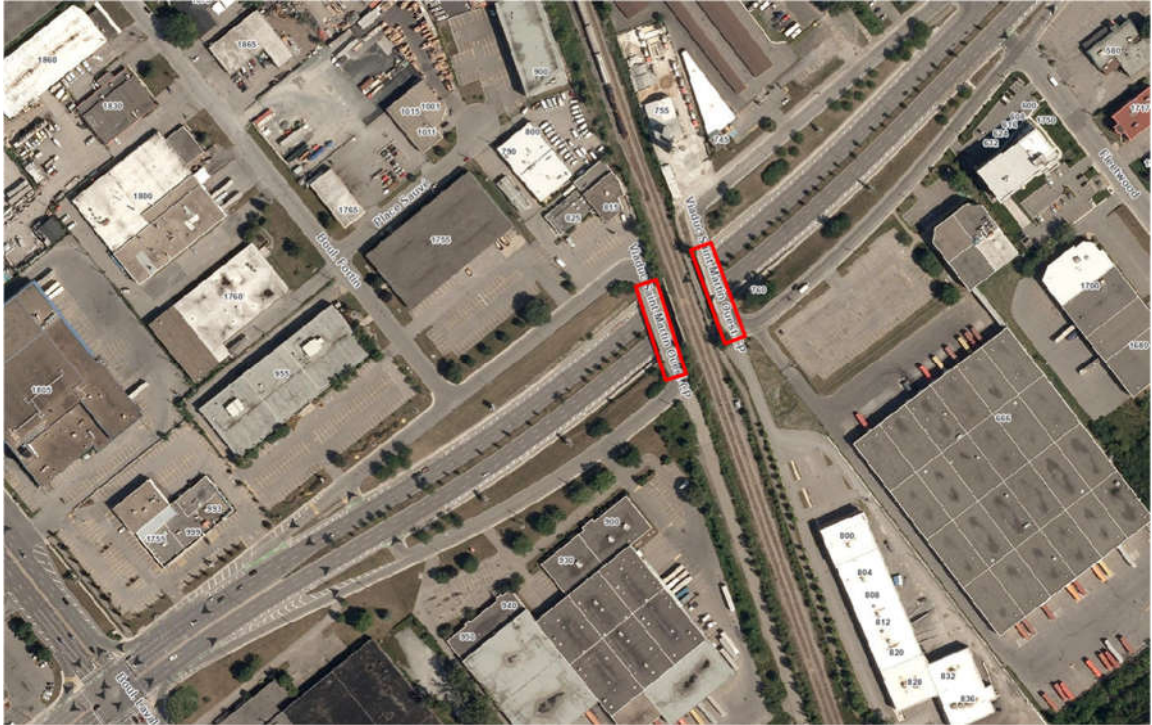


Figure 1 : Localisation des structures

2. Description de la structure actuelle

Conçues dans les années soixante-dix (1970), les structures #21061 et #21138 sont identiques entre elles. Ces ponts, à deux travées chacun, sont de type dalle épaisse en béton armé. La dalle a une épaisseur de 865 mm et celle-ci ne comporte pas d'armature de cisaillement. Aux extrémités, les fondations sont des culées intégrales (béquilles), alors que la dalle est simplement appuyée sur l'appui central. Ce dernier est de type mur en béton armé. Chaque structure a une longueur totale de 40,9 m avec chacune des travées ayant une longueur identique de 19,9 m, une largeur hors tout de 11,45 m et une superficie d'environ 456 m².

Les superstructures des ponts #21061 et #21138 comportent deux voies de circulation et un trottoir de 1,5 m du côté est du tablier pour le viaduc ouest et un trottoir de 1,5 m du côté ouest du tablier pour le viaduc est. Il y a des glissières sur

[illegible]

Technical drawing of the bridge structure showing the layout of the bridge deck, piers, and abutments. The drawing includes labels for 'CULÉE SUD', 'PIER CENTRAL', and 'CULÉE NORD'. It also shows various structural elements like 'GARDE-FOUS', 'PILON', and 'PONTON'. Dimensions and elevations are provided throughout the drawing.

3. Historique et description de la problématique

4

Dans le cadre de ces nouvelles inspections, des fissures s'apparentant à des fissures de cisaillement ont été relevées en septembre 2019. Un suivi de fissuration a été enclenché à partir de cette date afin de voir la progression des fissures. Un exemple de des fissures est présenté à la Figure 4.



Figure 4 : Exemple de Fissures de cisaillement relevées sur les structures

En décembre 2020, un mandat a été octroyé à SNC-Lavalin afin de réaliser l'évaluation de la capacité portante de la structure. L'évaluation a relevé des enjeux quant à la capacité de la dalle en cisaillement. Suite aux conclusions du mandat, il a été décidé d'afficher les deux ponts pour les camions sans surcharge en attendant les travaux de renforcement des structures.

En juin 2021, un mandat a été accordé à SNC-Lavalin pour la préparation des plans et devis relatifs aux travaux de renforcement et de réparation de ces deux structures.

4. Base théorique de la problématique

La résistance d'un élément en béton armé typique est représentée par l'équation suivante :

$$V_r = V_c + V_s$$

Où

- V_r représente la résistance totale de l'élément structural au cisaillement;
- V_c représente la contribution du béton à la résistance au cisaillement;
- V_s représente la contribution des étriers et des aciers transversaux.

Cette équation peut être représentée par le schéma présenté à la Figure 5.

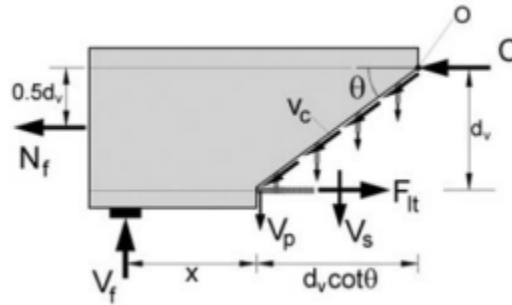


Figure 5 : Résistance au cisaillement d'un élément structural en béton - Tiré de Bentz et Collins (2006)

Le problème majeur relevé lors de l'évaluation de capacité portante de 2020 est la faible résistance au cisaillement à l'état endommagé principalement causé par ces deux éléments suivants :

- l'absence d'armature transversale dans la dalle ($V_s = 0$);
- la présence de fissures de cisaillement réduit grandement l'effet d'engrenure des granulats qui constitue la contribution du béton à la résistance au cisaillement (V_c). Cet effet est montré à la Figure 6.

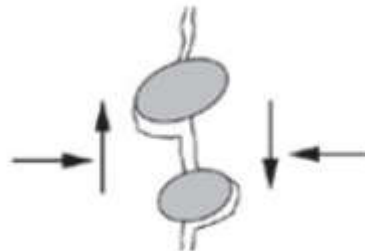


Figure 6 : Effet d'engrenure (v_c) - Tiré de Ince et al. (2007)

Le *Manuel d'évaluation de la capacité portante des ponts du Ministère des Transports du Québec* présente des façons de considérer ce type de défauts dans l'évaluation des ponts. Pour des ponts de type dalle épaisse sans armature de

cisaillement comme dans le cas présent, il y a une grande baisse de la résistance au cisaillement pour ce type de défaut. En effet, il n'y a pas d'acier d'armature qui peut intercepter les fissures et ainsi limiter leurs ouvertures. Dans le cas d'une dalle épaisse sans armature de cisaillement, la contribution du béton est le seul élément qui contribue pour la résistance au cisaillement. Une réduction de cet élément a donc un grand impact sur la résistance de l'élément au cisaillement.

Les ruptures par cisaillement dans les dalles épaisses sans armatures en cisaillement sont également critiques à cause du fait que ce sont des ruptures fragiles. En effet, puisque la défaillance se produit à travers le béton, il n'y a pas de ductilité tel que lorsque c'est l'acier qui plastifie avant de rompre. Ces modes sont donc difficiles à prévoir et doivent être évités.

5. Revue de littérature des méthodes de renforcement

Il a fallu trouver une méthode efficace pour le renforcement en cisaillement d'élément structural en béton armé de grande largeur tel que dans notre cas pour les dalles épaisses. Dans ce contexte, les méthodes par ajout de bandes de polymères renforcés en fibre de carbone (PRFC) sont difficilement applicables pour une dalle épaisse. Cette méthode se prêterait mieux à un renforcement en cisaillement d'une poutre puisque sa largeur est plus faible. Dans ce contexte, une méthode par ajout de barres d'armature verticales ancrées par adhésif époxydique constitue une méthode plus appropriée pour le présent projet. Cette approche a donc été choisie pour le présent projet.

Cette méthode permet d'augmenter la résistance au cisaillement en augmentant la contribution des armatures transversales. Avec cette méthode, il est possible d'augmenter la contribution de résistance au cisaillement des armatures (V_s) par l'ajout de barres d'armature. L'effet des forces de traction dans les barres additionnelles qui traversent les fissures de cisaillement va permettre d'augmenter la résistance au cisaillement de l'élément tel que montré à la Figure 7.

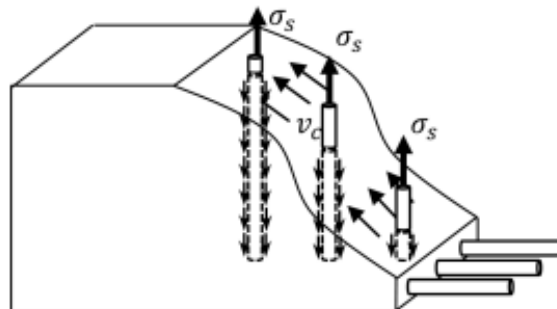


Figure 7 : Mécanisme de résistance au cisaillement des barres de renforcement - Tiré de Fiset et al. (2014)

Des études récentes dont notamment celle de Bédard (Bédard 2019) montrent l'efficacité de ce type de renforcement en cisaillement pour les dalles épaisses. Des spécimens tel que celui montré à la Figure 8 ont été étudiés dans le cadre de l'étude.

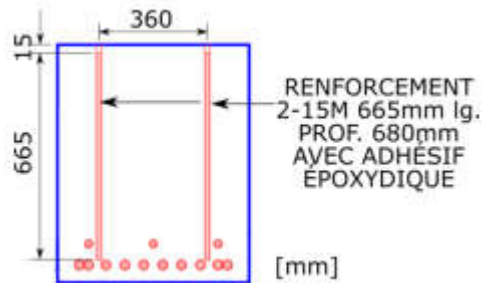


Figure 8 : Exemple de spécimen étudié pour le renforcement en cisaillement - Tiré de Bédard (2019)

Cette méthode est très dépendante des conditions d'ancrage des barres de renforcement. En effet, la longueur de développement et que l'adhérence des barres de renforcement dépend intrinsèquement des conditions d'ancrage des barres. Les éléments suivants peuvent influencer la contribution des barres :

- Propreté du trou de forage;
- Rugosité des parois;
- Temps de cure de l'adhésif;
- Température ambiante.

Il est donc extrêmement important que les indications du fabricant soient suivies afin de maximiser l'ancrage entre les barres de renforcement et le béton de la dalle existante.

La Figure 9 montre le mécanisme d'ancrage des barres de renforcement.

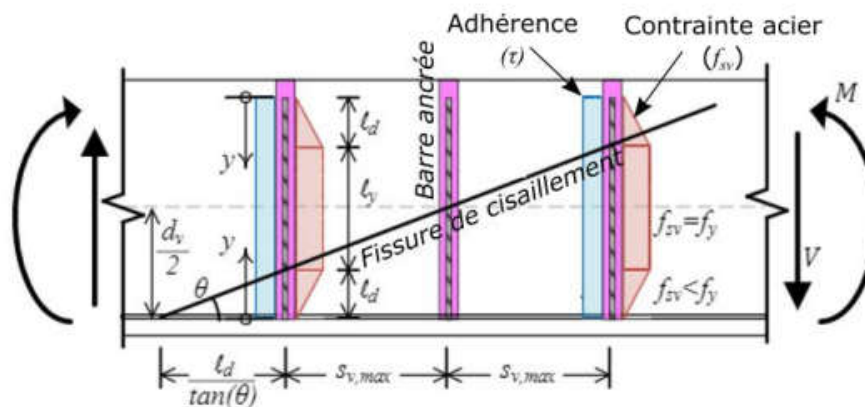


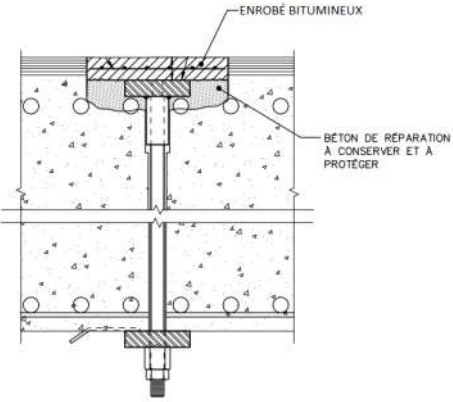
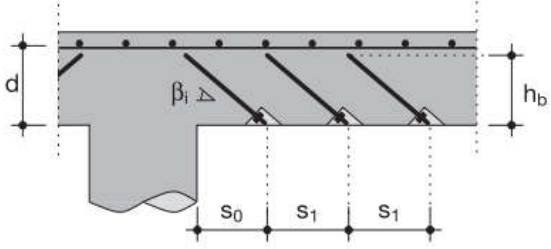
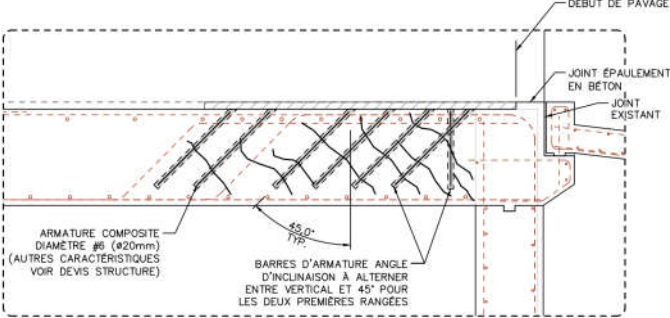
Figure 9 : Mécanisme d'ancrage des barres de renforcement - Tiré de Fiset et al. (2016)

Dans ce contexte, dans l'étude de Fiset et al. (2016), il est recommandé, pour déterminer l'espacement des barres dans ce type de renforcement, que chaque fissure d'angle θ intercepte au moins deux (2) armatures pleinement efficace. Les prescriptions d'armature minimale du Code S6 doivent également être respectées en plus de cette recommandation.

6. Options de renforcement

Pour remédier au manque de capacité en cisaillement des ponts, trois (3) solutions sont envisagées pour améliorer le comportement du pont tel que présenté au Tableau 1.

Tableau 1 : Option de renforcement

	Option 1 : Renforcement passif en cisaillement avec barres en acier droites verticales
 (Tiré de Hilti Corp. (2019))	Option 2 : Renforcement passif en cisaillement avec barres inclinées en acier
	Option 3 : Renforcement passif en cisaillement avec barres inclinées en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV)

La première option consiste à forer à travers la dalle et installer des barres de renforcement en acier avec plaques et écrou sur les deux extrémités des barres. Les barres sont verticales et droites dans cette option. Un avantage de cette option est le fait qu'elle peut être rendue active au besoin en utilisant des tiges d'ancrage en post-tension (ex. barres DYWIDAG). De plus, cette méthode est répandue pour le renforcement en cisaillement des dalles épaisses. Par contre, cette option nécessite une intervention à la fois sur le dessus du tablier et sur le dessous du tablier puisqu'il faut forer à travers toute la dalle pour y poser les plaques en aciers et écrous. Cet élément complique le maintien de la circulation puisque des fermetures seront nécessaires en haut et en sous le pont pour effectuer les travaux. De plus, l'esthétique du pont sera affectée par cette option de renforcement puisque les plaques d'acier et écrous seront visible par-dessous le tablier tel que montrée à la Figure 10.



Figure 10 : Plaque d'ancrage visible - Tiré de Pilon (n.d.)

Étant donné la présence d'une piste cyclable ainsi qu'un trottoir en dessous du pont, l'esthétique du pont constitue un élément important à considérer dans le choix de la solution à retenir. Un autre élément à considérer est le fait que les dalles sont des éléments structuraux généralement exposés aux sels de déglacage. Ce type de milieu d'exposition favorise la corrosion des barres d'armature en acier noir. Il devient donc nécessaire d'utiliser de l'acier inoxydable afin d'améliorer la durabilité de la réparation. Cependant, ce type d'armature est coûteux et son utilisation va augmenter considérablement les coûts associés à cette réparation.

La deuxième option consiste à forer par le dessous de la dalle et à installer des barres d'armature en acier avec plaque et écrou seulement sur le dessous des barres. Les barres sont inclinées dans cette option ce qui permet d'intercepter plus de fissures par barre. Cette option est un renforcement passif et la liaison entre le béton et les barres d'armature est assurée par un coulis. Contrairement à l'option 1, le renforcement peut être réalisé seulement par le dessous du tablier. Par contre, à cause du fait que cette solution est réalisée par un forage par le dessous du tablier, il y aura un risque de perte de coulis par gravité ce qui assurera une moins bonne adhérence entre le béton à réparer et les barres. De plus, cette réparation nécessite la création de niches dans la dalle afin d'installer les plaques en acier. Un autre désavantage de cette méthode est l'obligation d'utiliser des barres en acier inoxydable comme pour l'option 1 pour assurer la durabilité de la réparation.

La troisième option consiste à forer par le dessus de la dalle et à installer des barres en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV). Comme pour l'option 2, les barres sont inclinées dans cette option ce qui permet d'intercepter plus de fissures par barre. Cette option est un également renforcement passif et la liaison entre le béton et les barres d'armature est assurée par un coulis. Le renforcement est réalisé exclusivement par le dessus du tablier. Ceci permet de maintenir la circulation sous le pont durant les travaux en plus d'enlever le risque de perte de coulis. L'utilisation de barres en PRFV comporte plusieurs avantages. Tout d'abord, ce type de barres ne peut pas corroder. De plus, à cause de leur faible poids, la manutention des barres au chantier est également facilitée. Par contre, il y a un nombre limité de fournisseurs pour ce type de barres ce qui peut compliquer l'approvisionnement. De plus, au niveau de leur propriétés, les barres sont sensibles aux altérations et leur rupture.

Les avantages et inconvénients de chacune des options sont résumés au Tableau 2.

Tableau 2 : Avantages et inconvénients des options de renforcement

Option	Avantages	Inconvénients
Option 1 : Renforcement passif en cisaillement avec barres en acier droites verticales	› Possibilité de rendre l'ancrage actif › Méthode répandue pour le renforcement en cisaillement	› Utilisation obligatoire d'acier inoxydable pour les barres › Nécessité de forer dans la pleine profondeur de la dalle › Réduction de l'esthétique du dessous du pont
Option 2 : Renforcement passif en cisaillement avec barres inclinées en acier	› Meilleure efficacité pour le renforcement › Intervention par le dessous du tablier seulement	› Utilisation obligatoire d'acier inoxydable pour les barres › Délai plus long › Risque de perte de coulis › Obligation de créer une niche dans la dalle
Option 3 : Renforcement passif en cisaillement avec barres inclinées en polymère renforcé de fibres de verre (PRFV)	› Meilleure efficacité pour le renforcement › Aucune corrosion pour les barres en PRFV › Facilité de manutention › Grande résistance à la traction des barres	› Nombre de fournisseurs de barres en PRFV plus limité › Barres sont sensibles aux altérations › Rupture fragile

7. Option retenue

La troisième option a été retenue. Elle permet de palier à plusieurs faiblesses soulevées par les deux premières solutions. La durabilité est garantie avec ce type de barres puisqu'il n'y a aucun risque de corrosion. De plus, le fait que les travaux sont seulement réalisés par le dessus du tablier permet de faciliter le maintien de circulation en dessous du tablier et de réduire les entraves nécessaires tout en respectant le dégagement vertical sous le pont. L'esthétique du pont est également conservée puisqu'il n'y aura pas de niches ou de plaques d'acier visibles en dessous du tablier à la suite des travaux.

Le coût est semblable pour les trois options. En effet, en comparant l'utilisation de barres d'acier inoxydable à celle de barres en PRFV, les coûts sont comparables.

Pour le type de renforcement choisi, la grande résistance à traction des barres en PRFV constitue un avantage important. En effet, puisque les barres sont sollicitées en traction dans ce type de renforcement, leur résistance à la traction constitue un élément important à considérer. Une des faiblesses des barres d'armature en PRFV est lorsqu'il faut des barres pliées. En effet, ces barres ne peuvent pas être

pliées sur site. Par contre, dans le présent projet, il n'y a que des barres droites alors cet inconvénient ne sera pas présent dans le présent projet.

Ce type de barres de renforcement est également bien couvert dans les normes actuelles. En effet, les règles de calcul pour ce type de barres sont couvertes dans la norme S6-19. La norme CSA S807 couvre quant à elle tout le volet matériau de ce type de barres. Finalement, le *Cahier des charges et devis généraux* (CCDG) du Ministère des Transports du Québec dispose aussi d'articles pour la construction avec ce type de barres.

Le renforcement retenu est montré à la Figure 11.

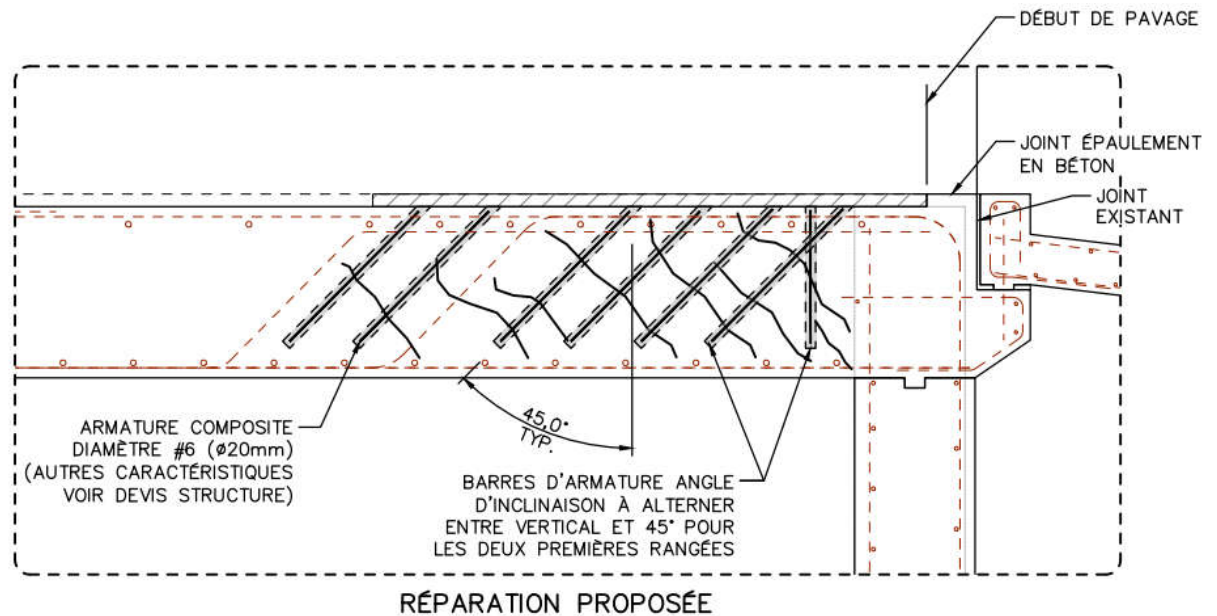


Figure 11 : Renforcement en cisaillement retenu

8. Procédure de réalisation de la solution retenue

La réalisation des travaux se découpe en cinq (5) étapes :

1. Localisation des barres d'armatures existantes par une méthode non-destructive
2. Forages des trous pour l'installation des barres en PRFV
3. Nettoyage des trous de forage selon les indications du fabricant
4. Mise en place du coulis d'ancrage
5. Mise en place des barres d'armature en PRFV

L'espacement des barres de renforcement a été choisi pour faciliter l'étape 1 des travaux. En effet, l'espacement transversal des barres a été choisi en fonction de

l'espacement des barres longitudinales et transversales existantes. De cette façon, transversalement, il est possible d'intercaler une barre de renforcement entre chaque deux barres d'armature longitudinales. Longitudinalement, une barre de renforcement est intercalée entre chacune des barres transversales. Le patron de barre de renforcement est montré à la Figure 11 et à la Figure 12.

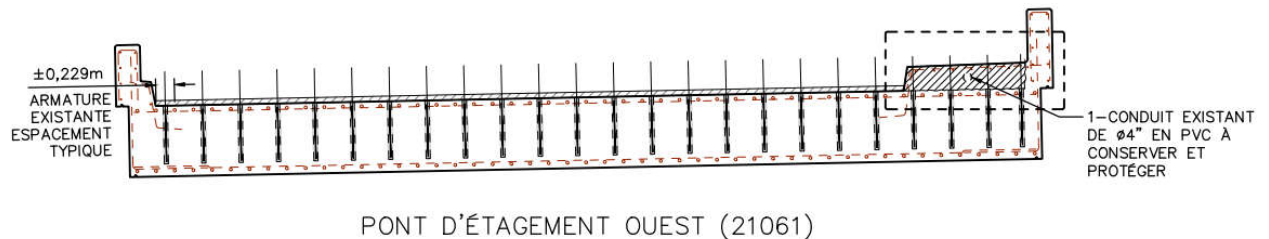
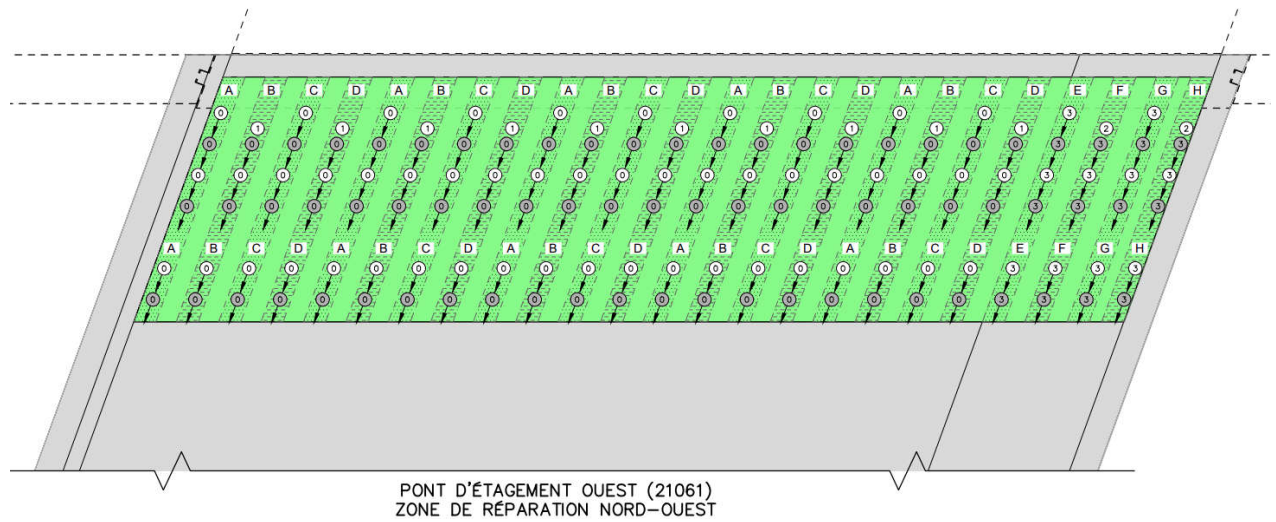


Figure 12 : Agencement des barres de renforcement

À cause de la grande quantité de barres de renfort à installer, il est important de s'assurer de l'intégrité structurale du pont lors des forages avant que les barres soient mises en place. En effet, les forages dans la dalle vont affaiblir la structure avant que les barres soient complètement installées. Un phasage de réalisation a donc été mis en place afin de s'assurer de l'intégrité de la dalle durant tout le projet. La séquence suivante a donc été mise en place et celle-ci doit être suivie lors des travaux :

- Débuter l'installation des renforcements par la zone de la phase "A", "B", "C" jusqu'à la phase "D" et ensuite procéder aux phases "E", "F", "G" jusqu'à la phase "H" successivement.
- Le forage des trous d'une même phase (ex. "A") doit être effectué en alternance en commençant par l'étape 1 et ensuite l'étape 2.
 - Il est important de noter que pour entamer le forage de l'étape 2, l'étape 1 doit être complètement terminée afin de s'assurer que la dalle ne soit pas trop affaiblie en même temps.
- Les phases précédentes doivent être complétées avant de débiter une nouvelle phase (ex. la phase "A" doit être entièrement complétée avant de débiter la phase "B")

Les phases et les étapes du phasage sont présentées à la Figure 13.



LÉGENDE:

- ① ANCRAGE TYPIQUE INCLINAISON DE 45°
(110 x 2 ENDROITS)
- ① ANCRAGE VERTICAL (10 x 2 ENDROITS)
- ② TROTTOIR ANCRAGE VERTICAL (2 x 2 ENDROITS)
- ③ TROTTOIR ANCRAGE TYPIQUE INCLINAISON DE 45°
(22 x 2 ENDROITS)
- A LETTRE DE PHASAGE
- # ÉTAPE 1 # ÉTAPE 2

Figure 13 : Phasage de réalisation

9. Conclusion

Lors des inspections des tournebrides au-dessus du boulevard Saint-Martin, des fissures de cisaillement ont été relevées sur les dalles épaisses. Des mesures de mitigation ont été mises en place et un renforcement en cisaillement pour le tablier a été conçu afin de palier à ce problème de la structure.

Une solution durable permettant d'augmenter la résistance au cisaillement du tablier tout en conservant l'aspect esthétique du pont et en respectant les contraintes de site a été conçue dans le cadre du mandat.

Afin d'augmenter la résistance en cisaillement du tablier, une méthode de renforcement par ajout de barres d'armature a été choisie. Une option d'intervention par-dessus le tablier a également été privilégiée afin de garder les dégagements minimaux nécessaires en-dessous du tablier et ainsi maintenir la circulation sous le pont lors de travaux. Pour assurer la durabilité des réparations, il a été opté d'utiliser des barres d'armature en PRFV. Ce matériau a comme avantages notamment de ne pas être sensible à la corrosion ce qui rend son utilisation idéale dans le dessus de la dalle qui est un milieu exposé aux sels de déglacage. De plus, le matériau possède comme avantages pour le présent projet d'avoir une résistance à traction élevée et une faible masse volumique.

Le renforcement présenté dans cet article a été basé sur des études antérieures. Cependant, un suivi du comportement des deux structures permettra d'évaluer l'efficacité à long terme de ce type de renforcement. Des éléments clés relevés lors du suivi pourront être relevés afin d'ajuster la méthode lors de projets futur afin d'améliorer la méthode présentée.

10. Références

1. Bédard, F. (2019). *Renforcement à l'effort tranchant des dalles épaisses en béton armé en conditions de service* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/9cbca89f-2450-4afc-a6f8-fba12b74ffb3>
2. Cusson, B. (2012). *Renforcement des dalles épaisses en cisaillement* [Mémoire de maîtrise, Université Laval]. CorpusUL. <https://corpus.ulaval.ca/entities/publication/83105928-c4ee-4a4f-bc72-962bda34a1d0>
3. Fiset, M., Bastien, J., Mitchell, D. et Jolin, M. (2012, 5-6 juillet). *Renforcement en cisaillement des dalles épaisses en béton armé : étude expérimentale et numérique*. Treizième édition des Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton, Lyon, France
4. Fiset, M., Bastien, J., et Mitchell, D. (2014). *Experimental and Analytical Studies of Strengthening using Drilled-in Bonded Reinforcement*. European Bridge Conference - 15th International Conference. 12 pages
5. Bentz, E. C., et Collins, M. P. (2006). *Development of the 2004 Canadian Standards Association (CSA) A23.3 shear provisions for reinforced concrete*. Canadian Journal of Civil Engineering, 33, pp. 521-534.
6. Fiset, M., Bastien, J., et Mitchell, D. (2016). *Methods for Shear Strengthening of Thick Concrete Slabs*. ASCE Journal of performance and constructed facilities
7. Ince, R., E. Yalcin et A. Arslan (2007). "Size-dependant response of dowel action in R.C. members." Engineering Structures 29: 955-961
8. Hilti inc. (2019). *Fastening Technology Manual : Post-Installed Punching Reinforcement Hilti HZA-P*, Tiré de https://www.hilti.co.uk/medias/sys_master/documents/h5c/h3b/9484552568862/Post-installed-shear-Reinforcement-HZA-P-Technical-information-ASSET-DOC-LOC-2521845.pdf
9. Pilon, B. (n.d.). *Renforcement en cisaillement des ponts de type dalle épaisse*. Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art, Québec, Canada