



Étude de cas de ponts piétonniers innovants en aluminium

Cusson, B.¹ and Toupin, J.-D.²

¹ WSP, Canada

² Proco, Canada

Juin 2019



Laval (Grand Laval)

Juin 12 – 15, 2019

ÉTUDE DE CAS DE PONTS PIÉTONNIERS INNOVANTS EN ALUMINIUM

Cusson, B.^{1,3} and Toupin, J.-D.^{2,4}

¹ WSP, Canada

² Proco, Canada

³ benoit.cusson@wsp.com

⁴ jdtoupin@proco.ca

Résumé: En 2017, WSP a relevé le défi de concevoir deux passerelles multifonctionnelles non conventionnelles en aluminium pour Parcs Canada pour l'utilisation au lieu historique national du Canal-de-Lachine. Le concepteur a conservé la géométrie des ponts ferroviaires du début du 19^e siècle afin de rappeler le riche patrimoine de l'ère industrielle qui a caractérisé le site. Le choix de l'aluminium pour les structures souligne que la vision de Parcs Canada est de marcher vers l'avenir et d'utiliser des matériaux innovants et exempts d'entretien. Les structures en aluminium de 27 m x 4,5 m en treillis pony-Warren sont complètement soudées et ne nécessitent aucun assemblage sur le site. C'est un exploit vu certaines contraintes liées à ce matériau. Les défis rencontrés pendant la phase de conception comprenaient des contraintes de vibration, de stabilité de la membrure supérieure sur les supports élastiques, de résistance ultime de l'aluminium soudé et des calculs des soudures. Les procédures de soudage et la stratégie d'assemblage du fabricant Proco à l'usine sont discutées. De plus, cette étude de cas explique comment la membrure supérieure en aluminium a été cintrée pour reproduire la déviation typique observée aux anciens ponts ferroviaires. Les détails au niveau des fondations, tels que les tiges d'ancrage, les appareils d'appui et les joints de dilatation, sont décrits afin de démontrer les effets de la dilatation thermique.

1 APERCU DU PROJET

En 2017, Parcs Canada a mandaté WSP pour évaluer la capacité portante de deux ponts piétonniers jumeaux construits dans les années 1970 sur le site historique national du Canal de Lachine à Montréal. L'étude a révélé qu'ils manquaient de capacité et qu'il était préférable de les remplacer que d'effectuer des travaux de renforcement. Concernant les solutions apportées aux passerelles traditionnelles en acier, le concepteur a suggéré d'utiliser l'alliage d'aluminium de type 6061-T6 pour les nouvelles structures. Le client a accepté cette approche innovante qui conduirait aux deux premières passerelles en aluminium de Parcs Canada au Québec. La deuxième phase du mandat consistait à élaborer des plans et devis détaillés pour les travaux délivrés à travers les appels d'offres publics traditionnels.



Figure 1: Concept architectural des passerelles évoquant la géométrie de l'ère industrielle

En réunion de démarrage, le client a fait appel à un expert du patrimoine qui a présenté la géométrie unique des treillis de l'ère industrielle du Canal de Lachine. WSP s'est ensuite lancée dans l'intégration de cette géométrie remarquable dans une passerelle compacte complètement soudée, ce qui était un défi compte tenu des contraintes imposées par ce matériau. Parcs Canada a demandé le remplacement rapide des deux ponts en raison du grand nombre d'utilisateurs quotidiennement (± 5000 cyclistes par jour). WSP a effectué la conception et la surveillance du site. Proco a été embauchée par l'entrepreneur général Simdev pour fabriquer les passerelles sous le contrôle de qualité d'Englobe. Les deux structures ont été installées avec succès à l'automne 2018.

2 DÉFIS DE CONCEPTION

2.1 Flexion de la membrure supérieure

En visant la géométrie triangulaire des anciens chemins de fer en treillis illustrée à la figure 1, le concepteur a dû prévoir une résistance suffisante dans la membrure supérieure vu que cette déviation se situe directement au milieu de la travée de la structure. Il était préférable de ne pas utiliser une connexion boulonnée pour des raisons esthétiques. Avoir un joint soudé à cet endroit aurait été désavantageux, car la résistance de l'aluminium est plus faible dans la zone affectée thermiquement par le soudage. La solution consistait à cintrer la partie centrale de la membrure supérieure en utilisant la technique de flexion à trois points.

Le devis permettait à l'entreprise de cintrage d'effectuer cette manœuvre dans les conditions T4 ou T6. La condition T4 nécessite une charge inférieure pour achever la plastification de la section en raison de sa limite d'élasticité inférieure. D'autre part, l'élément résultant aurait nécessité un traitement thermique pour atteindre la capacité structurelle T6 requise par le devis. La flexion dans l'état T6 nécessite plus d'efforts et le rayon doit être choisi judicieusement, car cet état est moins ductile que l'état T4. De plus, les âmes doivent être suffisamment épaisses pour éviter le flambement lors du processus de flexion. Finalement, le cintrage a été réalisée avec succès à l'état T6, assurant à la structure une membrure supérieure élégante, sans joint et résistante.

2.2 Joints soudés spéciaux pour les membrures

Le deuxième défi avec les membrures supérieure et inférieure était d'obtenir la longueur requise de 27 m, puisque la plupart des fournisseurs ne peuvent fournir que des sections d'environ 15 m de longueur. L'insertion de joints était inévitable et devait être judicieusement localisée pour des raisons structurales. Les joints ont été localisés près des tiers de la travée et l'orientation des diagonales a été choisie pour réduire la charge de compression avant ceux-ci. La membrure supérieure inclinée résultant du concept architectural a considérablement contribué à avoir une sollicitation en compression presque constante sur toute la longueur de la membrure supérieure. De cette façon, au lieu d'avoir une seule section critique au centre de la travée, le rapport de la demande sur la capacité de la membrure supérieure est presque constant pour toute la membrure supérieure.

La norme CAN/CSA S157-17 spécifie les dispositions concernant le calcul de la résistance d'une membrure soudée loin de ses extrémités. Elle traite une soudure transversale différemment d'une soudure longitudinale (qui peut, par définition, atteindre jusqu'à 45 degrés d'angle d'après la norme). Par conséquent, des joints spéciaux à 40 degrés ont été conçus et donc deux soudures longitudinales et deux soudures transversales ont été faites sur ces membrures. Ces deux types de soudures ont permis de développer une capacité supérieure à celle d'un joint soudé transversalement sur tout le périmètre.

2.3 Avantages et inconvénients de la légère densité de l'aluminium

L'aluminium est presque trois fois plus léger que l'acier. Étant donné qu'il est plus flexible aussi, il nécessite des parois plus épaisses pour atteindre la même rigidité. La règle générale appliquée pour les propriétés de ces matériaux est de considérer le poids d'une structure en aluminium comme la moitié de la structure équivalente en acier. Dans ce projet, la combinaison du poids léger du treillis en aluminium et du platelage en bois a permis de transporter les passerelles par camion comme un bloc monolithique. La grue pourrait

soulever les passerelles d'un endroit plus éloigné que si celle-ci avait été en acier. De plus, les dimensions des appuis étaient plus petites. Un autre grand avantage de la légèreté est le fait que la charge morte transmise aux semelles de la culée était faible. Après un processus d'optimisation, le concepteur a pu éviter les pieux et spécifier des fondations superficielles même si la capacité du sol était faible. Les culées ont été entièrement préfabriquées, expédiées par camion et installées rapidement sur le chantier. Ce fut un tournant dans l'atteinte des critères de remplacement rapide du projet.

D'autre part, la gestion d'une passerelle pour piétons et cyclistes ayant une longueur de travée de 27 m nécessite un équilibre délicat entre le poids et la rigidité afin de surmonter les enjeux de vibrations dus aux passages des usagers. L'idée principale soulignée dans les normes sur les ponts est de garder la fréquence naturelle de la structure la plus éloignée possible de la première harmonique ($\pm 2\text{Hz}$) ou de la deuxième harmonique ($\pm 4\text{Hz}$) des passages des piétons. L'optimisation de la profondeur du treillis et de la section des membrures a été un véritable défi lorsqu'on voulait maintenir le poids (coût) aussi bas que possible tout en tenant compte d'une rigidité suffisante des cadres transversaux en U supportant la membrure supérieure comprimée de ce treillis de type pony-Warren. De plus, la hauteur totale possible de la structure était limitée par l'espace libre sous les ponts routiers lors de la livraison. Après de nombreuses itérations, le concepteur a choisi une combinaison de paramètres qui répondait à toutes les contraintes mentionnées, sans nécessiter l'utilisation d'amortisseurs ni de lest.

2.4 Gérer la dilatation thermique

L'aluminium se dilate et se contracte deux fois plus que l'acier sous la variation de la température. Ainsi, cette structure de 27 m de longueur par 4,5 m de largeur était équivalente à un pont en acier de 54 m par 9 m quand il s'agit de la gestion des déplacements d'origine thermique. Trois composants secondaires devaient être fabriqués d'une façon personnalisée relativement à la dilatation thermique: le système d'ancrage, les joints de dilatation et les appuis. Le système d'ancrage a permis de fixer le pont à un de ses quatre coins. Deux ancrages ne bloquaient qu'une seule direction tandis que le dernier avait un trou spécial surdimensionné permettant un déplacement complet dans les deux directions. Le défi ici était de bien positionner les tiges d'ancrage à travers les trous dans la structure et ceux forés au chantier dans la culée préfabriquée. L'implication du concepteur était obligatoire à cette phase critique.

Les appuis en élastomère ont été choisis pour permettre au pont de se déplacer et de fléchir librement sous des charges régulières. Une plaque PTFE glissante a été incluse pour permettre le déplacement d'origine thermique longitudinal total possible de ± 50 mm à l'extrémité libre. Les joints de dilatation spécifiés pour ce projet ont été redéfinis pour répondre aux besoins de déplacement, le confort des cyclistes et les opérations de déneigement. Les boulons à tête fraisée à travers les trous oblongs de la plaque du joint de dilatation ont connecté la structure à une cornière en acier encastrée dans la culée en béton. Le réglage final de ces plaques a été planifié et exécuté sur le chantier. Pour toutes ces composantes, la clé de succès était de planifier des tolérances réalistes pendant la phase de conception afin d'éviter les débats avec l'équipe de montage sur chantier.



Figure 2: De gauche à droite: les tiges d'ancrage, les joints de dilatation et les appareils d'appui glissants

3 DÉFIS DE FABRICATIONS

3.1 Conception de soudage et procédures

La période de conception de l'assemblage a permis de créer une liste des différents types de joints soudés requis en fonction des différentes forces et la géométrie des nœuds. Soixante-huit soudures à pénétration complète et de nombreuses soudures d'angle à plusieurs passes jusqu'à 23 mm de dimension ont été conçues. Après avoir tenu compte de toutes les contraintes du projet, les paramètres de soudage classiques GMAW en mode de pulvérisation par impulsion ont été sélectionnés. Les procédures de soudage correspondantes ont été ensuite développées, testées et finalement certifiées par le CWB. Compte tenu de l'amplitude des soudures à réaliser, il était essentiel de contrôler la déformation des pièces soumises à des gains de chaleur. Une importance particulière a donc été accordée au séquençage des différentes étapes de soudage. En outre, le mode de pulvérisation par impulsion GMAW s'est avéré particulièrement efficace dans la réduction des gains de chaleur. Le résultat démontre qu'il est possible de contrôler efficacement les déformations, quelles que soient l'amplitude et l'asymétrie de la soudure à effectuer sur les éléments.

Dans ce projet, certains assemblages de soudure linéaires semblaient favoriser l'utilisation du soudage par friction-malaxage (FSW). Ainsi, les procédures ont été développées et les essais ont été réalisés dans les locaux de l'UQAC en collaboration avec le Centre de métallurgie du Québec (CMQ). Les premiers essais n'ont pas été concluants vu les défis rencontrés au niveau de l'alignement des soudures des extrusions. Dû à l'échéancier de livraison, les essais supplémentaires qui auraient été requis pour la qualification de la procédure ont été suspendus et nous n'avons pas pu compter sur cette méthode.

3.2 Qualité et inspection

En plus d'assurer l'intégrité structurelle du cadre, des précautions spécifiques ont été prises pour contrôler l'aspect esthétique final des passerelles. Les découpes, la préparation, l'assemblage et le soudage du cadre ont été réalisés dans une usine produisant également des cadres en acier. Pour éviter la contamination de l'aluminium, la production de l'acier a donc été suspendue temporairement. En outre, une entreprise spécialisée a assuré le nettoyage en profondeur des lieux, du matériel et des tables de travail avant le début de la fabrication. Tous les travaux ont été réalisés en respectant les exigences supplémentaires relatives aux « membrures à résistance critique à la rupture » de la norme CAN/CSA S6-14. Ensuite, comme certains éléments du projet devaient être anodisés, il était nécessaire de supprimer localement l'anodisation pour garantir des soudures de haute qualité.

Toutes les soudures à pénétration complète ont été inspectées par ultrasons, tandis que 50 % des soudures ont été inspectées par ressuage. Au total, près de 2 000 mètres linéaires de soudures d'angle ont été réalisés. De ce groupe, deux réparations ont été nécessaires pour corriger un léger manque de pénétration et cinq autres pour corriger un manque de fusion. Les facteurs les plus importants pour obtenir ces résultats de haute qualité sont les procédures, les équipements, l'environnement de travail et la qualité des soudeurs. Les éléments ont été polis pour éliminer toute imperfection de surface de la fabrication et assurer une apparence uniforme de l'aluminium avant la livraison.



Figure 3: De gauche à droite: l'assemblage à l'usine, tests de soudage par friction malaxage (FSW), culée en béton préfabriquée et levage de la grue

4 CONCLUSION

4.1 Innovation

Plusieurs sujets évoqués dans cette étude de cas prouvent le caractère innovateur de ce projet. La corde supérieure cintrée, la structure légère soudée en aluminium sans joint mécanique et les joints spéciaux des membrures supérieures et inférieures créant une magnifique géométrie patrimoniale sont des exemples d'innovation. Surmonter les défis de dilatation thermique, de vibration et de soudage devraient également être notés. La planification rigoureuse du projet a conduit à une brève fermeture de l'accès à la passerelle de trois semaines. Ainsi, ce projet reflète la détermination de Parcs Canada à moderniser l'utilisation des matériaux choisis pour l'entretien des canaux historiques.

4.2 Leçons retenues

Les ingénieurs intéressés par la conception de ponts et passerelles en aluminium doivent être conscients de la disponibilité limitée des grandes sections structurales. Il est important de mener suffisamment de recherches avec les fournisseurs aux étapes initiales du projet. Les calculs de soudage et l'exécution nécessitent un volume important de travail et ne doivent pas être négligés, en particulier pour les structures isostatiques telles que ces passerelles. Au final, tous les participants à ce projet sont fiers du résultat de leur travail.

Remerciements

Les auteurs aimeraient exprimer leur gratitude à Parcs Canada pour l'opportunité de diriger ce projet des études préliminaires à l'achèvement. Englobe, Groupe Conseil en Soudage 2012 (GCES) et le Centre québécois de recherche et de développement de l'aluminium (CQRDA) sont remerciés pour leur collaboration dans la résolution des défis intrinsèques au matériau du projet. Le centre d'expertise sur l'aluminium (CeAl) d'AluQuébec est remercié pour son aide à entrer en contact avec des ressources techniques clés dans le domaine de l'aluminium.