

Passerelle haubanée de 55 m avec structure de bois

Remplacement de la passerelle Matamajaw
Renommée Passerelle Cédrico

Ce rapport a été réalisé dans le cadre du Programme
de vitrine technologique pour les bâtiments et les
solutions innovantes en bois

18 août 2022

Marc THÉRIAULT, ing.

Auteur

Véronique BOUILLON

Réviseur

Laval ROBICHAUD

d.-g. Ville de
Causapscal

Avis de non responsabilité

Le contenu et les résultats de ce rapport sont produits et présentés par le promoteur du projet. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs ainsi que le Fonds vert ne sont donc pas responsables du contenu de ce document.

Table des matières

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude	3
2. Introduction.....	4
2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction.....	4
2.2 Description du projet de construction.....	4
2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante.....	4
2.2.2 Échéancier global et durée.....	5
2.2.3 Budget global	5
2.2.4 Partenaires.....	5
2.2.5 Défis et risques généraux.....	6
3. Détails de l'étude	7
3.1 Introduction et hypothèses de départ.....	7
3.2 Objectifs.....	8
3.3 Méthodologie	9
3.3.1 Le tablier	10
3.3.2 Les pylônes	14
3.3.3 Les toitures.....	15
3.4 Résultats et analyse	17
3.5 Conclusions	19
3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	19
3.7 Recommandations.....	19
4. Bibliographie.....	20
5. Annexes	20

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

Cette étude présente la démarche et les résultats obtenus lors de la reconstruction de la passerelle Matamajaw, à Causapscal, QC, et depuis renommée Passerelle Cédrico.

L'ancienne passerelle en bois avait atteint sa fin de vie utile et était fermée aux usagers depuis près de 2 ans. Le conseil municipal, propriétaire de la passerelle, désirait la remplacer par une structure avec un entretien minimaliste afin d'éviter la dégradation survenue sur la passerelle en bois initiale. Au fil du projet, le choix du bois comme matériau structurel principal est devenu une condition *sine qua none* pour des raisons culturelles et historiques, mais il incombait de démontrer qu'une telle structure serait viable et répondrait aux critères suivants :

- Esthétiquement beau;
- D'une architecture cadrant avec le site patrimonial Matamajaw adjacent;
- Avec un tablier bas afin de maintenir au minimum la construction des approches ou d'entrer en conflit avec les glaces lors des crues de la rivière;
- Avoir un tablier de niveau, car les 2 rives sont à des niveaux différents et l'ancienne passerelle était inclinée;
- D'entretien économique et durable (75 ans);
- Avoir des membrures élancées (aucun élément massif lourd pouvant nuire au paysage);
- Ne pas être de type suspendue comme la passerelle d'origine;
- Avoir un style original;
- Minimiser l'emprise sur le terrain du musée Matamajaw;
- Ne pas être de type pont couvert pour des raisons d'attroupement pouvant mener à du vandalisme;
- Utiliser au maximum le bois de sciage disponible localement

La seule configuration possible pour atteindre tous ces objectifs a été d'utiliser le concept de passerelle à haubans en développant un platelage en bois ultra mince. La protection des pylônes par des toitures indépendantes, plutôt que par un revêtement direct a quant à elle donné l'élément de style caractérisant la passerelle.

Deux défis principaux ont donc dirigé la conception de tous les éléments : la protection à long terme contre les intempéries tout en gardant le bois le plus visible possible, et la réalisation d'un platelage mince sur une distance de 57 m sur 3 m de large capable de supporter les charges piétonnes, et de neige, ainsi que les charges concentrées de la machinerie de pose et de déneigement, le tout en contrôlant les vibrations inhérentes à une structure à haubans.

Le tablier a finalement été réalisé par des sections préfabriquées de madriers de sapin et d'épinette de 38 x 140 mm posés sur le chant, cloués et comprimés par des tiges transversales suivant un serrage contrôlé. Du contreplaqué, des solins, des fascias en bois traité ainsi que 2 types des membranes ont été utilisées selon une géométrie réfléchie de manière à ne permettre aucune accumulation d'eau pouvant nuire à la pérennité de l'ouvrage.

Les culées et contrepoids ont été réalisés en béton armé selon les techniques conventionnelles, et toute la quincaillerie, les garde-corps et les câbles sont en acier galvanisé.

2. Introduction

2.1 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

La passerelle Matamajaw, qui s'appelle maintenant Passerelle Cédrico, a été construite à Causapscal, au Québec, et relie le Parc de la pointe et le site historique Matamajaw. La passerelle enjambe la rivière Matapédia, rivière reconnue pour son saumon, et aussi pour ses crues printanières importantes.

2.2 Description du projet de construction

Le projet consistait à remplacer la passerelle suspendue en bois de 45 m qui était en place depuis plus de 40 ans et qui avait atteint sa fin de vie utile. L'accès en avait d'ailleurs été interdit aux usagers depuis 2 ans au moment



Figure 2: Entrée sud de l'ancienne passerelle

où a débuté la construction, car les coûts d'entretien devenaient exorbitants de par la détérioration de plusieurs composantes principales et aussi des difficultés d'accès au personnel municipal pour en permettre l'entretien.



Figure 1 Vue aérienne de l'ancienne passerelle

Une reconstruction pure et simple avec un élargissement pour en permettre l'accès facile aux bicyclettes, quadriporteurs et piétons a donc été jugé la seule solution viable par le conseil municipal, propriétaire de la passerelle.

2.2.1 Description du bâtiment innovant ou de la solution innovante

La seule configuration possible pour atteindre tous les critères retenus par le propriétaire a été d'utiliser le concept de passerelle à haubans en développant un platelage en bois ultra mince. La protection des pylônes en bois lamellé-collé fut assurée par des toitures indépendantes à double versant.



Figure 4: Géométrie des pylônes

Les culées et contrepoids ont été réalisés en béton armé selon les techniques conventionnelles, et toute la quincaillerie, les garde-corps et les câbles sont en acier galvanisé.

La portée de la passerelle est de 57 m entre les culées, et ses toitures à deux versants couvrent chacune une surface de $\pm 5 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ à 10 m de hauteur du sol.



Figure 3: Vue aérienne de la nouvelle passerelle

Les connecteurs d'acier galvanisé ont été dessinés dans le respect des décorations de l'époque victorienne et plusieurs représentent des éléments reliés au saumon de l'Atlantique. La couleur de l'ensemble est d'une teinte de brun pâle, et les éléments d'acier sont gris zinc. Le recouvrement de la toiture en bardeaux de cèdre prendra la teinte grisonnante caractéristique de cette essence.



Figure 5: Détail des connecteurs d'acier

2.2.2 Échéancier global et durée

À l'origine, le projet devait se dérouler sur une année, et la portion construction sur 2 mois en saison estivale. Cependant, de nombreux délais administratifs, la hausse des coûts des matériaux de construction, la pandémie de Covid-19, ainsi que les délais pour ficeler le financement ont fait se prolonger le projet sur 5 ans. Par contre, il s'est écoulé 7 mois entre le jour du début de la démolition (12 juillet 2021) et le jour de l'ouverture au public (12 février 2022), incluant 2 arrêts de chantier de 2½ mois au total dus à des retards de livraison de matériaux.



Figure 6: Inauguration

L'inauguration officielle a eu lieu le 14 juin 2022.

2.2.3 Budget global

Au total, le projet a coûté 1 485 101 \$, dont 1 278 572\$ directement reliés à la construction. Le solde a servi pour les levées de fonds, les demandes de permis et les études diverses requises par les divers paliers de gouvernements et bailleurs de fonds, ainsi que pour l'ingénierie, la surveillance des travaux et la gestion de projet. Les sommes indiquées incluent toutes les taxes.

2.2.4 Partenaires

Le projet a été rendu possible grâce à la contribution financière de très nombreux citoyens via une levée de fonds public, ainsi que par des partenaires corporatifs et gouvernementaux. À ce chapitre, le Groupe Cédrico, le gouvernement du Québec et Développement économique Canada ont sans contredit été les partenaires financiers majeurs du projet.

La Ville de Causapscal a été le moteur du projet, en particulier le maire M. André Fournier appuyé sans faille par le conseil municipal, et le directeur général M. Laval Robichaud. La Ville s'est également adjoint la collaboration de la MRC de La Matapédia, via le service du développement économique pour le montage et la recherche de financement, ainsi que le service du génie pour la gestion de projet.

La firme Innovation Amerik a quant à elle été mise à contribution pour l'ingénierie et le design complet de la passerelle ainsi que pour la surveillance des travaux et l'accompagnement entourant les diverses demandes de permis et relations avec le ministère de la Culture, le ministère de

l'Environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MMELCC)¹ et le ministère de la Forêt de la faune et des Parcs (MFFP), ainsi que le ministère Pêches et Océan Canada.²

C'est l'entreprise Parko inc. et sa filiale Construction Bressau inc, suite à un appel d'offres public, qui ont été les maîtres d'œuvre, tant de la démolition, que de la construction de la nouvelle passerelle. Leurs principaux sous-traitants furent :

- Les entreprises L. Michaud, pour l'excavation et l'enrochement de protection,
- Pro-Armature, pour le ferrailage des culées en béton armé;
- Béton Provincial Ltée, usine de Lac-au-Saumon, pour le béton;
- Gooddfellow inc, pour le bois lamellé-collé des 2 pylônes,
- Soucy industriel et Structures PMI, pour les connecteurs d'acier et les garde-corps;
- Lam-É-St-Pierre, pour les câbles d'acier galvanisé et les différents tendeurs;
- Bélanger paysagiste, pour l'engazonnement des approches.

La firme LER de Rivière-du-Loup a quant à elle été mandatée pour le contrôle des matériaux, de la compaction des sols, ainsi que du contrôle qualitatif du béton.

L'éclairage d'ambiance interactif de la passerelle a été conçu et réalisé par la firme Novom Interactive inc., en collaboration avec l'entreprise Yvan Tremblay Électrique.

2.2.5 Défis et risques généraux

Le défi de base fut le financement. Vinrent ensuite les défis reliés à la réglementation en vigueur, et finalement ceux reliés à l'ingénierie en lien avec les particularités du site et l'utilisation du bois comme matériau principal.

La rivière Matapédia étant une rivière à Saumon, et la présence de canards arlequins plongeurs ayant été notifiée en amont de la rivière Causapscal (qui se jette dans la Matapédia légèrement en amont de la passerelle), des dates de travaux précises devaient aussi être respectées, au risque de devoir reporter les travaux l'année suivante.



Figure 7: Arlequin plongeur

¹ Au début du projet, ce ministère portait le nom de ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDELCC)

² Ces deux ministères sont à présent fusionnés sous le nom de ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction et hypothèses de départ

La passerelle maintenant démolie et qui était située au même endroit que la nouvelle, avait atteint sa fin de vie utile. Construite en 1971, elle était de type suspendue, essentiellement en bois, avec des câbles d'acier galvanisé et des suspentes en acier peint. Le bois avait été récolté localement et choisi avec soin pour ensuite subir un traitement de préservation à la fumée dans des étuves. Quarante ans plus tard, les difficultés liées à l'accès pour l'entretien des contreventements situés sous le tablier, la dégradation des membrures des pylônes à leur assise, en plus de la faible largeur de la passerelle en regard des nouvelles normes, ont convaincu la municipalité d'opter pour un remplacement plutôt que pour des réparations devenues très dispendieuses.

Les critères qui furent à la base de l'étude tout au long du projet de reconstruction, furent les suivants :

- Esthétiquement beau et original;
- D'une architecture cadrant avec le site patrimonial Matamajaw adjacent;
- Avec un tablier mince afin de maintenir au minimum la hauteur des approches et surtout pour ne pas entrer en conflit avec le passage des glaces lors des crues de la rivière;
- Avec un tablier de niveau, car les 2 rives sont à des niveaux différents et l'ancienne passerelle était inclinée;
- D'entretien économique et durable (75 ans);
- Avec des membrures élancées (aucun élément massif lourd pouvant nuire au paysage);
- Ne pas être de type suspendue comme la passerelle d'origine;
- Minimisant l'emprise sur le terrain du site patrimonial Matamajaw;
- Ne pas être de type pont couvert pour des raisons d'obstruction du paysage et d'attroupement pouvant mener à du vandalisme;
- Utilisant le bois et au maximum le bois de sciage disponible localement
- Être utilisable par les piétons, les cyclistes, l'équipement de déneigement municipal, et les véhicules pour personnes à mobilité réduite.

Il est important ici de ne pas sous-estimer l'importance du requis concernant la minceur du tablier. En effet, les crues de la Matapédia sont importantes et au niveau élevé des eaux, s'ajoute celui difforme des amas de glace, sans oublier les arbres déracinés qui descendent le cours à la même époque. Si on ajoute à cela le dénivelé important entre les 2 rives, et qu'on utilise un tablier ayant trop de hauteur, il pouvait en découler rapidement l'apparition d'une approche non seulement haute sur la rive la moins élevée, mais inévitablement longue avec tout ce que cela comporte comme contraintes d'encombrement.

Toutes ces contraintes ont rapidement guidé le choix vers une passerelle à haubans.

De là sont ressortis 2 inconnues : comment obtenir un tablier mince, durable, facile à entretenir et utilisant le plus possible du bois d'œuvre ; et comment assurer aux pylônes en bois une protection durable et viable tout en offrant un esthétisme répondant aux goûts du client et de la population. Il

n'était en effet pas envisageable d'utiliser de l'acier pour l'élément structural principal (pylône) d'une construction se voulant en bois.

Les exemples existants de passerelles haubanées en bois, bien que n'étant pas légion, sont tout de même assez nombreux pour orienter la conception. Par contre, toutes utilisent plus ou moins un agencement similaire, où le tablier repose sur deux ou trois longues poutres longitudinales, elles-mêmes soutenues par des traverses reliées aux haubans à leurs extrémités. Cette configuration, efficace et solide, est cependant assez volumineuse et requiert l'utilisation de sections profondes en bois lamellé-collé ou en acier.



Figure 8: Passerelle des Trois-Sœurs

Également, les pylônes sont souvent constitués soit d'acier, soit de bois lamellé collé exposé aux intempéries. Quelques exemples existent avec un parement recouvrant les pylônes en bois, ou, plus rarement (et souvent pour des passerelles de petite portée) l'installation d'une toiture recouvrant chaque pylône individuellement. Ici, les pylônes envisagés avaient 10 m de hauteur.

La conception de structures de passerelles en bois pour des portées de 30 m et plus du point de vue du calcul est, malgré que l'acier soit prépondérant, un domaine où les données et les exemples sont assez bien connus. Par contre, là où le bât blesse, c'est en ce qui concerne la protection efficace de ces structures afin d'en minimiser la fréquence et les coûts d'entretien et du coup en assurer la pérennité et rendre l'utilisation du bois intéressante aux yeux des propriétaires et donneurs d'ouvrages, et non seulement anecdotique.

En ce qui a trait aux coûts d'entretien, les frais liés à l'accessibilité des surfaces à entretenir doivent être considérés. Ainsi, dans la réflexion, une poutre en bois avec un revêtement de protection aux intempéries est plus onéreuse à entretenir qu'une poutre sans revêtement, mais à l'abri des intempéries. Si en plus la poutre est difficilement accessible, les coûts gonflent rapidement. Il incombe donc, dès l'étape de conception, de tout faire pour limiter la fréquence des interventions d'entretien.

3.2 Objectifs

Afin d'atteindre les requis de conception, il a été décidé de concevoir un tablier constitué de lamelles de madriers sur le chant, allant d'une traverse à l'autre sans poutres longitudinales.

Il a également été convenu de concevoir des toitures à deux versants avec la géométrie requise pour protéger efficacement les pylônes en bois.

L'acier ne devait servir que pour les connecteurs, les traverses, les garde-corps et les câbles des haubans et tirants.

La géométrie de chaque élément devait permettre de garder les surfaces de bois à l'abri des eaux de pluies en utilisant la règle de recul selon l'angle de 30 degrés avec la verticale; et aussi de

permettre une évacuation rapide de toute eau si jamais elle devait malgré tout entrer en contact avec la structure (pluie lors d'orages violents, rosée matinale, neige accumulée fondant, etc)

Tout au long de la conception, cinq critères devaient à chaque fois être atteints pour chaque élément : résistance structurale, durabilité face aux intempéries, facilité d'entretien et esthétique. En aucun temps, un critère esthétique ne devait l'emporter sur la durabilité et la facilité d'entretien, à moins d'une demande expresse du client en ce sens. Au final, le critère économique est venu départager des solutions équivalentes.

3.3 Méthodologie

Au Québec et au Canada, la référence à respecter pour le calcul des ponts et passerelles est la norme CAN/CSA S6 *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*. Cette norme réfère ensuite à la norme CAN/CSA O86 *Règles de calcul des charpentes en bois* pour ce qui concerne les membrures de bois, et à la norme CAN/CSA S16 *Règles de calcul des charpentes en acier* pour l'acier de structure. Quand aux culées de béton armé, elles ont été faites à l'aide de la norme CAN/CSA A23.3 *Calcul des ouvrages en béton*, ainsi qu'à l'aide de la documentation de Transport Québec pour ce qui est des règles de l'art.

La modélisation de la structure s'est faite avec le logiciel d'analyse SAFI 3.0 pour les portions acier et bois, à l'exception des dalles de tablier en bois qui ont été calculées manuellement.

La norme CAN/CSA S6 prévoit déjà dans ses pages une procédure de dimensionnement pour des platelages précontraints en bois lamellé sur le chant avec tiges de serrage transversales (section 9.23). Les calculs ont montré qu'avec les charges piétonnes (3,1 kPa) ou de neige au sol (4,1 kPa) et concentrées (50 kN), des madriers de catégorie ÉPS no 1 et 2 d'une portée de 4268 mm (14 pieds) étaient aptes à reprendre ces charges.

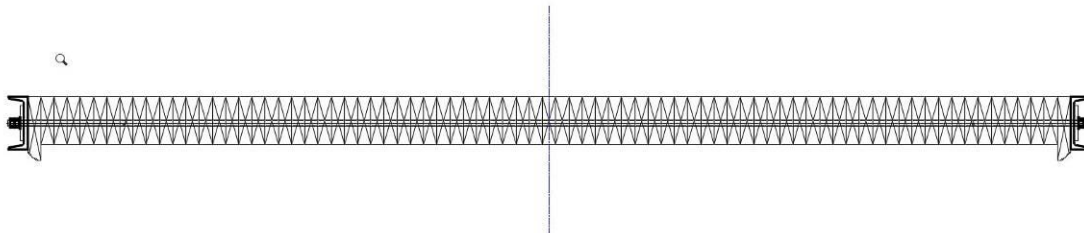


Figure 9; Coupe transversale tablier précontraint

Le choix d'une portée de 4268 mm s'avérait justifié sur le fait qu'il s'agissait d'une longueur commerciale facilement disponible, donc limitant la perte de matériau, et aussi parce que géométriquement, une fois pris en compte les traverses, cela donnait un multiple quasi parfait de la longueur de la passerelle en considérant 13 sections, donc 12 traverses.

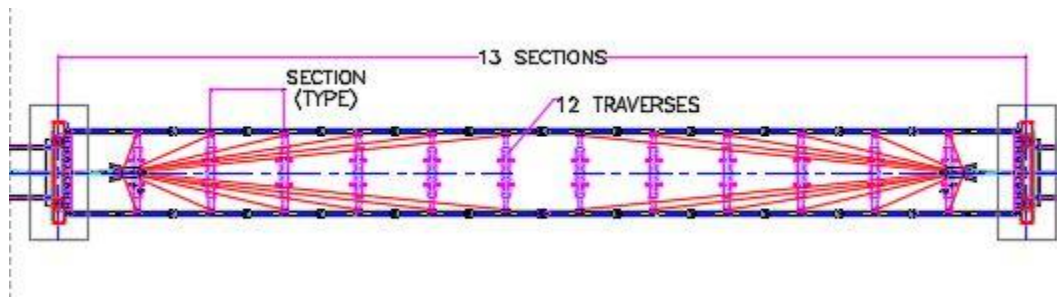


Figure 10: Géométrie, vue en plan

3.3.1 Le tablier

Sur un pont acier-bois conventionnel, le platelage en bois précontraint est disposé sur des poutres longitudinales, de sorte que les lamelles sont perpendiculaires à la circulation et que la résistance à la flexion est assurée par les lamelles en bois. Dans le cas contraire, où les lamelles sont disposées parallèlement aux poutres longitudinales, la résistance à la flexion est assurée par les tiges de post-tensionnement et par la portion des lamelles en compression; cette configuration est moins résistante.

Dans le cas de la passerelle à l'étude, les lamelles ont été posées longitudinalement, mais résistent comme dans la situation décrite dans la norme comme étant transversale, puisque l'appui ne se fait non pas sur des poutres longitudinales, mais directement sur les traverses. La flexion est reprise entièrement par les lamelles même si elles sont disposées longitudinalement.

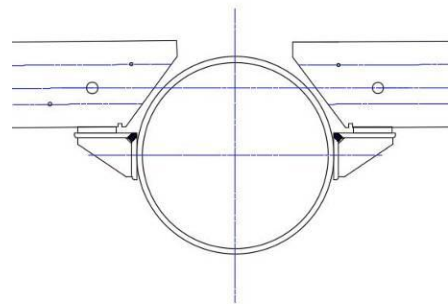


Figure 11: Appui des lamelles

C'est cette disposition qui permet d'éliminer les poutres longitudinales présentes sur la majorité des ponts et passerelles à haubans et ainsi permettre d'amincir le tablier.

Par contre, l'absence de ces poutres a un effet contraignant sur la résistance horizontale longitudinale en compression dans le tablier, inhérente aux structures haubanées et qui est absent des structures de type suspendues. Ce point important sera traité plus loin.

Pour tous les requis structuraux et dimensionnels de la section 9.23 de la norme CSA S6, le platelage était conforme, quoique souvent de justesse, sauf en ce qui a trait au requis quant à la hauteur des profilés en C de serrage. Il n'existe pas sur le marché de profilés standards de ce type ayant 140 mm de profondeur comme la hauteur des lamelles utilisées (38x140 mm), il en existe des 152 mm et des 127 mm. Théoriquement, le profilé de 127 mm aurait été adéquat. Par contre, géométriquement, il causait problème, car il ne permettait pas l'utilisation de rondelles carrées de 76x76x10 mm. Il rendait aussi difficile la fabrication d'attaches standards pour les garde-corps fixés à ce même profilé, et il pouvait surtout devenir une source d'accumulation d'eau. Il a donc été convenu d'utiliser la capacité d'un profilé C127 dans les calculs, mais d'utiliser un profilé C152 et de l'appuyer sur un profilé en bois 38x184 (2x8) en guise de première lamelle afin de bien répartir la pression.

Point important, la norme CSA S6 interdit de fixer au profilé de répartition en acier des dispositifs de retenue (9.23.8.1). Sur un pont routier, ces dispositifs peuvent être soumis à des forces d'impact considérables pouvant engendrer des bris majeurs au système de post-tension advenant le cas où ils y seraient fixés. Malgré le fait que de telles forces sont absentes d'une passerelle cyclo-piétonnière, il n'en demeure pas moins que l'idée de base de ne pas induire de forces extérieures à la membrure de répartition demeure pertinente. Afin de pouvoir quand même fixer les garde-corps en acier à ce seul élément en acier du platelage pour des raisons pratiques et de durabilité, une plaque continue en acier galvanisé a été soudée sur la semelle supérieure du profilé C150 et visée sur le dessus des 3 premières lamelles en continu. Cette plaque, en plus de reprendre les charges latérales horizontales induites par le garde-corps, permettait également de servir en tant que larmier de bordure et de faciliter la pose du C150 lors du montage.

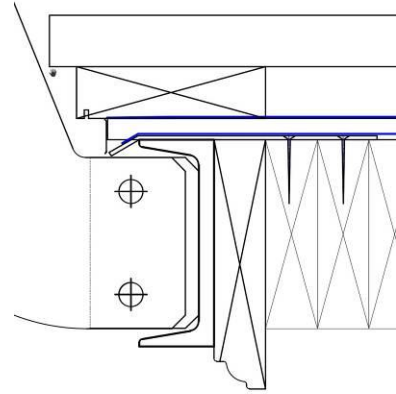


Figure 12: Détail étanchéité de tablier

Pour des raisons de durabilité, une membrane élastomère autoadhésive 1,0 mm Blueskin a été posée sur toute la surface des lamelles et par-dessus les larmiers soudés aux profilés C150. Un contreplaqué traité de 16 mm a été vissé à 100 mm c/c dans les 2 directions avec des débords de 25 mm latéralement et de 50 mm longitudinalement pour éloigner l'eau de la structure. Des larmiers en aluminium ont ensuite été posés sur tout le pourtour du contreplaqué et le tout a été recouvert d'une seconde membrane élastomère, cette fois d'une épaisseur de 4,0 mm avec fini granulé de 4,6 kg/m² Soraply Traffic Cap de Soprema. Une surface de marche et de roulement faite de madriers de bois traité ACQ disposés à 45 degrés sur 4 lisses longitudinales déposées sur la membrane et fixées sporadiquement avec des vis préalablement trempées dans du scellant extérieur translucide, recouvre et protège la 2^e membrane.

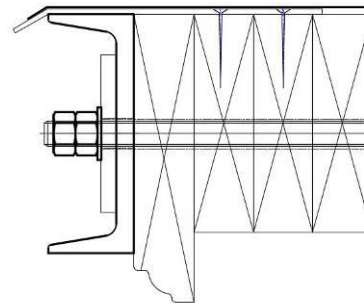


Figure 13 : Détail de bordure

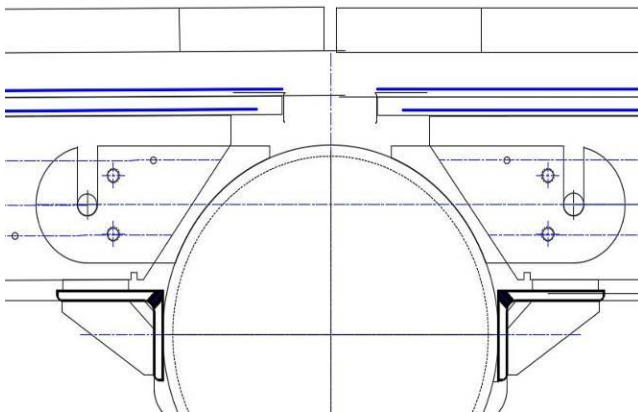


Figure 14: Détail étanchéité du tablier aux appuis

Les extrémités de toutes les lamelles des dalles de platelage ont été biseautées à la fois pour épouser le contour des traverses en tubulaire d'acier galvanisé rond, mais aussi pour empêcher tout contact avec l'eau de ruissellement provenant de la surface supérieure. Des précautions ont aussi été prises afin que cette eau de ruissellement ne vienne pas en contact avec les surfaces d'appuis des lamelles sur les traverses, via des surépaisseurs en acier aux appuis et des trous de drainage.

Finalement, en terme de protection contre la pourriture, les premières lamelles en madriers 38x184 furent prescrites en bois traité ACQ, et toutes les surfaces visibles des lamelles (en dessous) furent traitées avec du préservatif à bois afin de protéger durablement ces surfaces du brouillard émanant de la rivière, même si elles ne seront jamais exposées à la pluie. Le bas des lamelles de bordure en madriers 38x184, sur leur côté extérieur, ont également été moulurées selon un angle général de 45 degrés afin d'éloigner au maximum des intempéries cette surface exposée et créer du même coup un larmier. Des rainures ont également été pratiquées sous les extrémités des lamelles du platelage afin d'éliminer le déplacement horizontal de l'eau sous les surfaces inférieures.

Afin d'éviter tout flambement de la section de platelage mesurant 3000 mm de large sur 4268 mm de long, un contreplaqué a été posé sur le dessus du platelage afin de réduire tout risque de flambement de la dalle lors de la mise en tension des tiges.

Cependant, la mise en tension a comprimé les sections de 38 mm au point qu'une lamelle supplémentaire de 38mm a été requise pour conserver la largeur de 3000 mm. Il a donc fallu non pas 79 lamelles, mais bien 80 lamelles de madriers 38 mm pour atteindre la largeur de 3000 mm. Cela correspond donc à une réduction de section d'environ 0,5 mm par madrier de 38 mm. Cette situation a donc obligé la pose du contreplaqué après la mise en tension finale. Aucun flambement de la dalle n'a cependant été observé tout au long du processus de serrage en 3 étapes prescrit par la norme (9.23.3.4).

Tel qu'introduit plus haut, la géométrie des passerelles et des ponts haubanés engendre des transferts de forces de compressions longitudinales dans le tablier jusqu'aux culées, en particulier durant la construction alors que l'ensemble du tablier n'est que partiellement en place. L'angle des haubans engendre ici cette force horizontale, contrairement à la géométrie de type pont suspendu dont les suspentes des traverses sont parfaitement verticales. Plus la charge sur le tablier est importante et plus la compression augmente longitudinalement. Le phénomène s'en trouverait théoriquement diminué une fois tout le tablier en place, mais c'est sans compter la présence des nécessaires joints de dilatation thermique qui nécessitent une interruption de la continuité du tablier.

De plus, le cas de chargement particulier ou une foule quitte une rive en un groupe compact et entame la traversée a été jugé très problématique. En effet, lorsqu'une charge piétonne est appliquée sur le tablier d'un côté d'une traverse, alors que rien n'est appliqué sur la section de tablier situé de l'autre côté de la traverse, il s'en suit l'induction d'un moment de giration dans les traverses. Si on ajoute à cela la charge horizontale décrite précédemment, et surtout que l'on considère la relative légèreté des dalles par rapport à la masse d'un front de foule en traversé, il pourrait en résulter une monté des dalles et des traverses, causant ainsi une faillite en accordéon du tablier.

Le même type de chargement se produit également lors de la construction, alors que l'équipement de levage motorisé se déplace sur la structure entièrement en porte-à-faux avec une dalle de platelage à poser à l'extrémité de la dernière en place.

Afin de bloquer ce mouvement de giration des traverses et reprendre, conjointement avec les dalles de platelage lamellé, les efforts de compression longitudinale, deux membrures en bois relient entre elles les traverses ainsi que les culées aux extrémités.

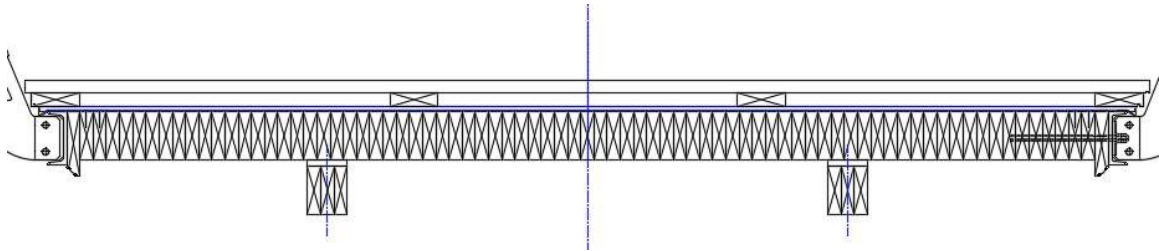


Figure 15: Poutres antigiratoires sous tablier

Or, cette configuration, bien qu'intéressante théoriquement, a cependant montré ses limites. En effet, une mauvaise fabrication des quatre membrures de compression fixées aux culées (2 à chaque extrémité), a permis de confirmer à la pose que des charges importantes de compression et des moments étaient effectivement transférés par ces membrures, mais aussi que les dalles relativement légères du platelage pourraient se soulever vers le haut advenant un bris de ces membrures.

Comme les risques d'un mauvais entretien sont réels et que ces membrures sont parmi les moins accessibles de la structure, il a été décidé d'ajouter 2 lignes continues de profilés d'acier galvanisé afin de reprendre tant les charges de compression, que les moments de giration des traverses. Les profilés ont été orientés de manière à maximiser leur résistance en flambement latéral dans le plan horizontal. Bien que n'utilisant pas le bois, cette configuration est néanmoins préférable tant au plan de la durabilité, que de l'entretien et de la facilité de pose. L'utilisation du bois pour ces membrures impliquait de les positionner sous le platelage pour les protéger des intempéries, mais en compliquait du même coup l'entretien et le risque encouru en cas de mauvais entretien et de dégradation n'était pas acceptable.

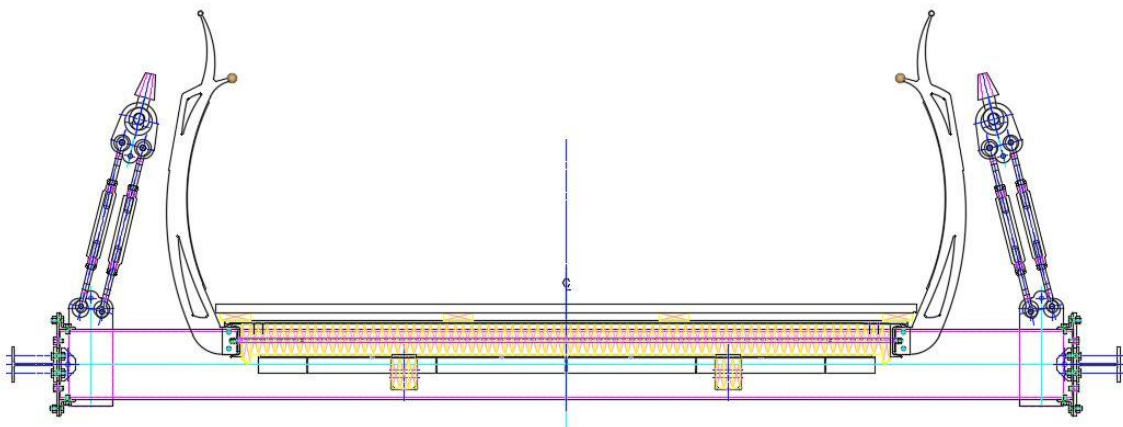


Figure 16: Coupe complète du tablier

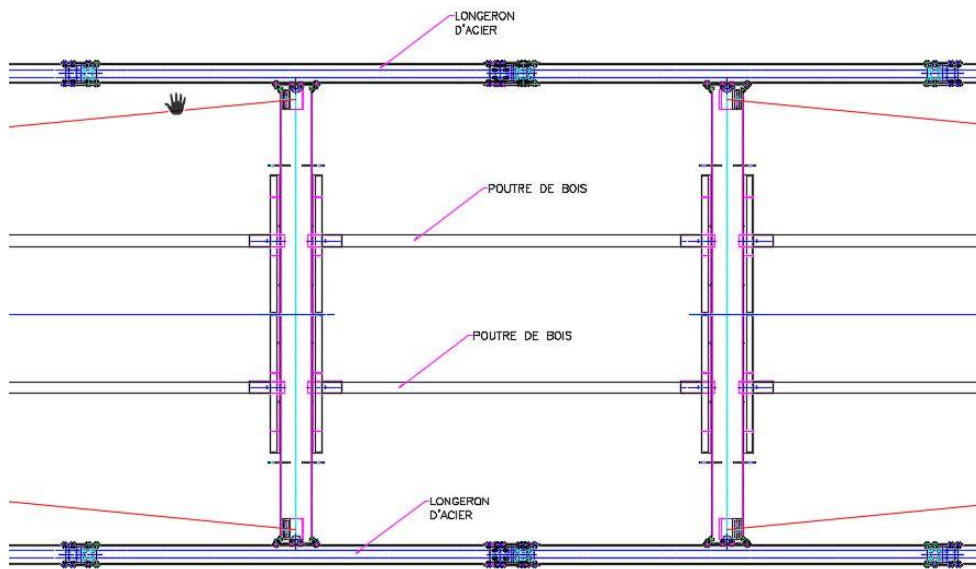


Figure 17: Vue en plan des longerons

3.3.2 Les pylônes

La configuration choisie pour les pylônes a été un double « A ». Chaque pylône est ainsi composé de deux chevalets avec chacun deux membrures verticales inclinées se rejoignant à leur sommet et reliées vers leur centre par une traverse horizontale, formant ainsi la forme de la lettre « A ». Les bases des deux chevalets en « A » sont localisées sur la culée, donc à proximité l'une de l'autre, tandis que leurs sommets sont très distancés.

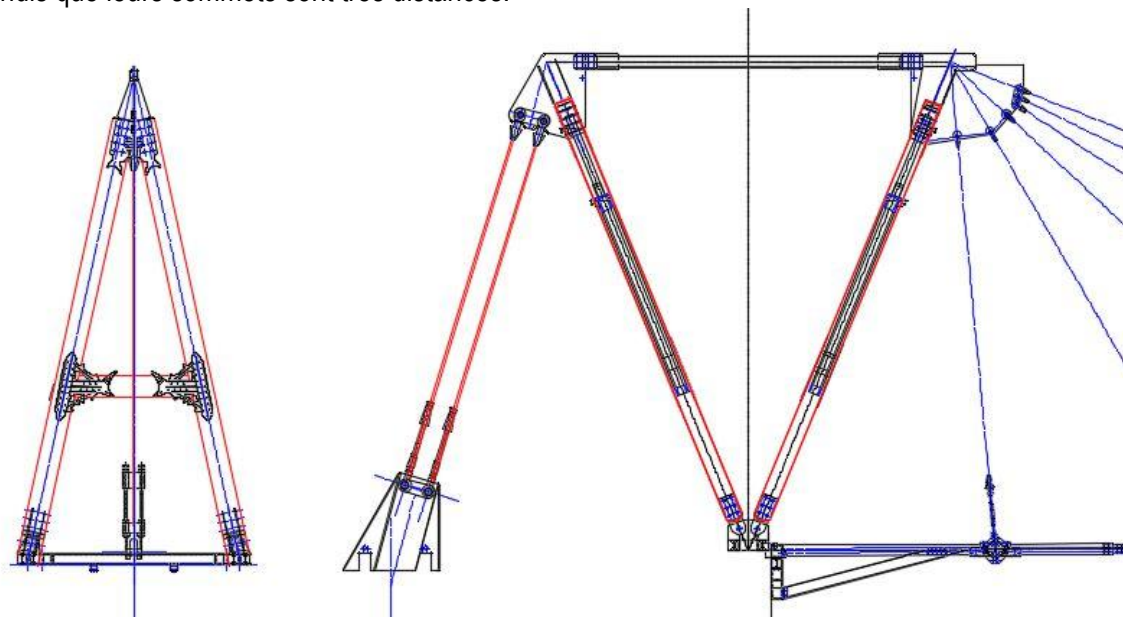


Figure 18: Pylônes en A

La géométrie en « A » à l'avantage d'être très stable latéralement pour résister aux vents, d'épouser la forme à deux versants de la toiture, tout en nécessitant un minimum de membrures. De plus l'inclinaison ne nuit pas à la circulation, auquel cas une configuration en « H » aurait été requise.

L'utilisation de deux chevalets au lieu d'un seul recèle deux avantages : il permet d'une part d'avoir un tirant de retenu arrière quasi vertical, donc induisant moins de forces horizontales dans le massif d'ancrage, et d'autre part d'offrir une ossature pour appuyer la toiture. La configuration en « A » a aussi l'avantage de permettre l'utilisation d'un tirant central agissant comme élément dissuasif pour empêcher le passage de véhicules automobiles sur la passerelle.

L'assise des colonnes des pylônes doit se faire sur des pivots, car le bois résiste mal aux connexions avec moment. Des joints sur pivots ont depuis longtemps été développés par l'industrie. Cependant, dans un souci de réduire au maximum les risques de trappe à eau entre les extrémités des membrures en bois et la plaque d'assise en acier, une configuration en biseau a été développée afin de garantir un écoulement de l'eau vers la pointe inférieure pour évacuation. Cette configuration a aussi l'avantage de naturellement guider et de maintenir la membrure en place et ainsi soulager les boulons de la connexion qui pourraient induire des fissures dans la membrure en cas de mauvais fonctionnement du pivot en service ou à la pose, surtout que les membrures sont ici inclinées en permanence pour toute la durée de vie de l'ouvrage.

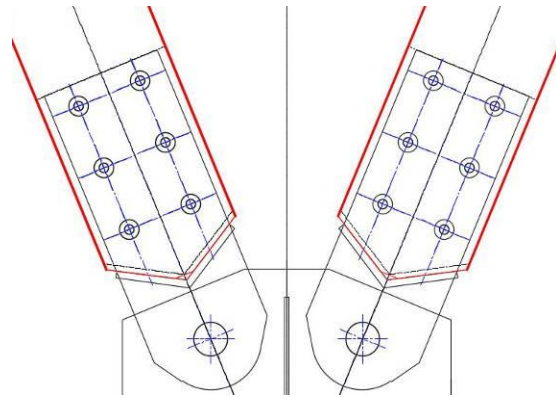


Figure 19: base de colonne en biseau

3.3.3 Les toitures

À tous les points de vue, sauf celui de l'esthétisme, l'utilisation d'une structure de toiture appuyée directement sur les membrures des pylônes en suivant le même angle que ces derniers était, et demeure, la meilleure avenue.

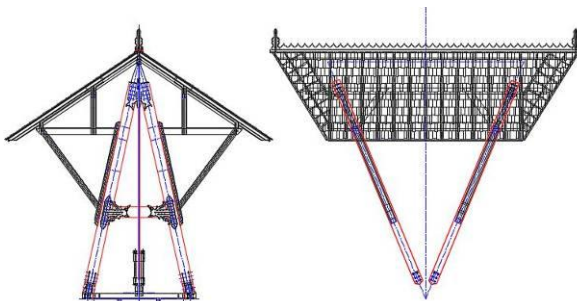


Figure 21: Toiture à 34 degrés

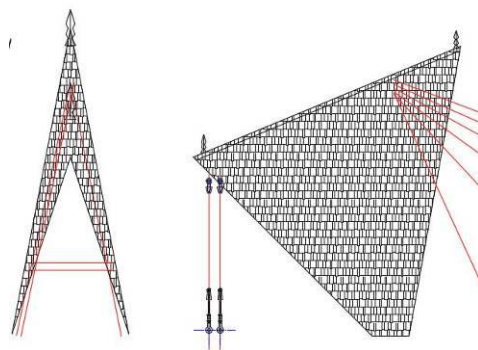


Figure 20: Toiture à 78 degrés

Par contre, pour des raisons d'acceptabilité sociale quant à cette géométrie de toiture à très forte pente qui déplaisait, et pour se rallier à une certaine similitude avec les bâtiments patrimoniaux environnant, il fut

requis d'opter pour une toiture avec des versants d'un angle de 34 degrés avec l'horizontale au lieu des 78 degrés des colonnes des pylônes.

Ce requis a permis de donner une ampleur et un panache que n'aurait pas eu la configuration d'origine. Par contre, il a induit certaines conséquences: augmentation considérable des charges de neige et de son débalancement, changement des charges aux massifs d'ancrage, changement important de la prise au vent, élévation du centre de gravité, nécessité de déployer et d'augmenter la surface de toiture afin d'efficacement protéger la base des pylônes de la pluie poussée par le vent, augmentation des coûts tant en matériaux, qu'en pose et complication de l'accès à la toiture pour la construction et l'entretien.

La conception de la structure en bois de la toiture a permis d'utiliser la technique des membrures à plusieurs plis constituées de sections de madriers de bois d'œuvre agencées ensemble afin de former des connexions emboîtées. Des tirants en câbles d'acier galvanisé avec tendeurs et serre-câbles ont aussi été incorporés pour augmenter la résistance de la structure et aussi pour en faciliter le contreventement et l'équerrage au montage.

La fabrication de membrures par agencement de madriers est une technique peu utilisée, mais pourtant rapide, pratique et économique lorsque vient le temps de fabriquer des membrures de bois autrement qu'en bois massif et en lamellé-collé.

Le recouvrement de la toiture est en bardeau de cèdre blanc de l'est scié. Ce bois a prouvé sa durabilité lorsque bien posé et il s'agence parfaitement avec les toitures du site patrimonial Matamajaw, aussi revêtues de bardeaux de cèdre. Par contre, le bardeau de bois n'a pas la durabilité et la rapidité de pose d'un revêtement de tôle. C'est pour garantir le plus possible la durée de vie des bardeaux et leur inspection (et aussi pour des raisons esthétiques) que la face inférieure des bardeaux a été laissée visible, leur procurant ainsi une meilleure aération. De plus, une bande de papier goudronné a été posée entre chaque rang de bardeaux pour mieux garantir l'étanchéité de la toiture et uniquement du clou galvanisé fut utilisé; le tout combiné aux règles de pose de ce type de revêtement (biseaux, débords, espacement, pureau, etc).

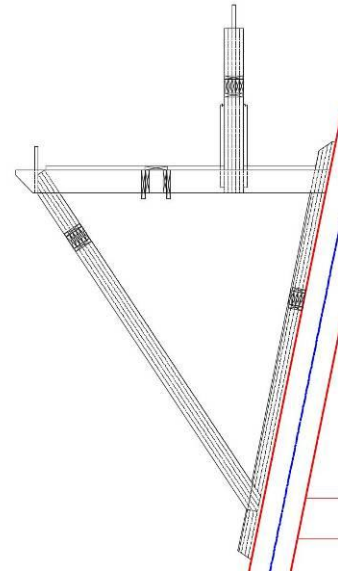


Figure 22: Membrures composites

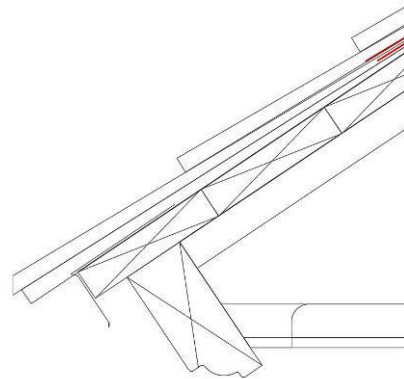


Figure 23: Détail de débord de toiture

3.4 Résultats et analyse

L'étude a permis de réaliser une passerelle à haubans sans poutre de support longitudinale afin de maintenir au minimum l'épaisseur du tablier et d'utiliser le bois comme élément structural en flexion et en contreventement.

Les dalles de lamelles en bois offrent un contreventement latéral surpassant les attentes tout en étant l'élément porteur unique entre chaque traverse. La mise en place de ces éléments préfabriqués s'est aussi bien déroulée et a même pu être effectué avec un petit tracteur à flèche mobile roulant sur le tablier en construction au lieu de l'imposante grue stationnée en rive prévue à l'origine.

La relative légèreté du tablier combiné à la forte disparité des charges à supporter (un coureur versus une foule en mouvement ou de fortes accumulations de neige), font en sorte que les haubans ne sont pas tendus sous de faibles charges, et que des vibrations sont perceptibles lorsque seulement quelques piétons se déplacent sur la passerelle. Ces oscillations ne rendent pas la traversée inconfortable et sont inférieures à ce qui est fréquemment perceptibles sur des structures haubanées ou suspendues. Les tentatives de mettre la structure en résonance ont permis de constater que malgré les flèches obtenues, l'état de résonance n'était pas atteint. Il a aussi été constaté que les oscillations légères induites sous

faible charge disparaissaient complètement en positionnant une masse de ± 3000 kg au centre de la passerelle.

Les structures des deux pylônes, incluant les toitures, présentent aux passants une vue plutôt complète des possibilités de la construction en bois : lamellé-collé de sapin de Douglas, connecteurs d'acier alliant robustesse, durabilité et élégance, tirefonds, boulons, vis, clous, tiges filetées, emboitements, sections composites, madriers d'épinettes de différentes sections, fourrures, bardeaux sciés de cèdre blanc, SCL, bois traité ACQ, et où la géométrie de chaque élément a été pensée en fonction de le protéger de l'eau.

Le choix d'utiliser le plus possible le bois d'œuvre local fut également un choix économique et pratique, car toutes les composantes, et en particulier les poutres composites se sont



Figure 24: Dessous du tablier en bois



Figure 26: Travaux de montage

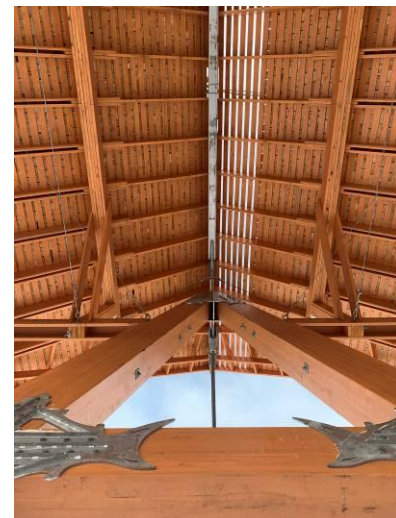


Figure 25: Détails de la structure des toitures

montées facilement et n'ont souffert aucun retard de livraison. Cela ne fut pas le cas pour les composantes lamellées collées qui ont nécessité de nombreux ajustements dimensionnels.

Après avoir passé un premier hiver avec de fortes accumulations de neige avec débalancement sur les versants, ainsi que des vents violents, la structure se porte très bien.



Figure 27: Montage des pylônes en A



Figure 28: Passerelle Cédrico complétée et éclairée

3.5 Conclusions

L'étude a permis de montrer qu'il est possible de préfabriquer des dalles de platelage de passerelle de 150 mm d'épaisseur en lamelles de madriers de construction et permettant à la fois de résister tant comme élément de flexion, que de contreventement, que de support de garde-corps, et avec une protection contre les infiltrations d'eau, le tout en conformité avec les exigences de la norme CSA S6 *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*.

L'étude a également permis de démontrer qu'il est possible de construire une toiture de protection entièrement en bois et respectant les critères d'éloignement et évacuation de l'eau pour des pylônes de 10 m de haut. La structure en bois demeure donc à la fois visible et à l'abri des intempéries.

3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie

L'étude a démontré la faisabilité de fabriquer en usine des dalles de platelage de pont minces et étanches, en lamelles de bois, qui peuvent ensuite être livrées et posées facilement. Ces dalles peuvent aussi être démontées pour remplacement lors de futurs travaux de restaurations.

L'excellente tenue en cisaillement de ces dalles de bois a permis d'éliminer le traditionnel contreventement sous le tablier, ce qui élimine plusieurs tracasseries majeurs reliés à l'accessibilité pour l'entretien, en plus de simplifier la pose et de réduire au minimum l'épaisseur du tablier.

L'étude a aussi permis de développer une géométrie de toiture en bois permettant de protéger une structure de pylône de 10 m de haut en bois lamellé-collé, en plus de développer un connecteur d'assise en pointe permettant le drainage de l'eau.

3.7 Recommandations

Les éléments qui se dégraderont en premier sont les mains courantes en bois des garde-corps, suivi du recouvrement en madrier de bois traité recouvrant tout le tablier, et finalement les bardeaux de cèdre de classe A des 2 toitures avec leurs ornements (épi de faîtage et dorsale de faîte). Hormis pour le bardeau, la dégradation des autres éléments n'a aucune incidence structurale. Par contre, un manquement à l'entretien de la toiture conduirait rapidement à une dégradation de la charpente et des pylônes. Tant que du bardeau traité avec un préservatif sous pression ne sera pas disponible sur le marché, il sera requis, à chaque 5 ans, d'appliquer un traitement préservatif de surface à la toiture.

Le choix des sous-traitants et de la main-d'œuvre est un élément clé pour obtenir un ouvrage de qualité, durable et pour éviter les retards de construction.

Finalement, l'analyse rigoureuse de chaque détail de construction, pour le simplifier, élimine les risques de retards en fabrication et en chantier tout en améliorant la qualité des ouvrages.

4. Bibliographie

- GROUPE CSA CAN/CSA S6-06 *Code canadien sur le calcul des ponts routiers.*
- GROUPE CSA CAN/CSA O86 *Règles de calcul des charpentes en bois.*
- GROUPE CSA CAN/CSA S16 *Règles de calcul des charpentes en acier.*
- GROUPE CSA CAN/CSA A23.3 *Calcul des ouvrages en béton.*

5. Annexes

Plans de la passerelle 2019.44, Innovation Amerik, 31 janvier 2022