

# SYSTÈME DE RENFORCEMENT IN SITU D'UN PORTIQUE DE SIGNALISATION AÉRIENNE EN ALUMINIUM – ESSAI DE CHARGEMENT D'UNE POUTRE TRIANGULÉE RENFORCÉE AU MOYEN DE DIAGONALES DE RENFORT TÉLESCOPIQUES

**Marcel Vallières, ing. M. Sc.**

Direction des structures  
Ministère des Transports du Québec

**Bruno Massicotte, professeur titulaire**

Groupe de recherche de génie des structures  
École Polytechnique de Montréal

**Résumé :** La structure de signalisation aérienne généralement utilisée au Québec est un portique normalisé de type A1 constitué d'une structure triangulée en aluminium. Capable de supporter de grands panneaux au-dessus d'une autoroute, cette structure requiert parfois des renforcements ou des réparations qu'il est souhaitable de réaliser in situ plutôt qu'en atelier. Le ministère des Transports du Québec a mis au point un système de renforcement in situ d'une poutre triangulée au moyen de membrures dotées d'assemblages mécaniques permettant d'ajuster la longueur in situ selon des angles variant de 45° à près de 90°. Les premiers essais ayant permis de vérifier la capacité des différentes pièces sous différentes conditions de chargement, l'étape finale du programme expérimental a pu être réalisée afin de vérifier la résistance réelle d'une poutre triangulée dont une extrémité est renforcée à l'aide de deux membrures télescopiques. Le présent article présente les résultats expérimentaux de ce dernier essai de chargement réalisé au laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal et trace un bilan du programme expérimental.

## 1. INTRODUCTION

Le portique de signalisation aérienne de type A1 est un ouvrage normalisé constitué d'une structure en aluminium comportant une poutre triangulée généralement assemblée à deux supports principaux. D'une portée variant normalement entre 16,5 m et 30,0 m (voir figure 1), cet ouvrage doit supporter une grande variété d'équipements routiers de grandes dimensions, tels que les panneaux de supersignalisation et les panneaux à messages variables. Ces équipements jouent un rôle essentiel pour assurer la sécurité routière. Il importe donc de les maintenir en place et de faciliter les travaux d'entretien et de réparation d'un ouvrage.

A priori, la conception d'un système permettant de renforcer ou de réparer un ouvrage devait exclure toute solution requérant du soudage au chantier ou l'utilisation de produits chimiques in situ. De plus, il fallait concentrer nos efforts sur les méthodes permettant de renforcer une poutre triangulée tout en évitant de percer les pièces principales de celle-ci, soit les longerons. Le choix d'un système de renforcement basé seulement sur l'utilisation de méthodes mécaniques s'est alors imposé. La conception a pu être faite pour les portiques dont les poutres triangulées ont les dimensions indiquées au tableau 1.

D'emblée, une bride d'attache devait être conçue en s'assurant de développer une bonne résistance en friction à l'interface entre la bride et le longeron. De plus, il fallait pouvoir résister à des charges en tension ou en compression en considérant une inclinaison importante, bien loin de la perpendicularité considérée dans les premiers modèles de renfort télescopiques installés de part et d'autre des brides de raccord d'une poutre triangulée. Finalement, il fallait aussi concevoir différentes diagonales de renfort pour des angles variant de près de 90° jusqu'à 45°, et ce, en fonction des caractéristiques des différentes poutres triangulées des ouvrages présents sur le réseau routier. Forcément, la conception d'un tel système de renforcement in situ devait être faite par phases, certains éléments dépendant des résultats des essais.

Le programme expérimental a donc été planifié en trois phases. La phase 1 visait les essais sur deux types de brides afin de sélectionner les plus efficaces pour résister au glissement ; un point d'arrêt était prévu de façon à ajuster la conception en fonction des résultats des essais. La phase 2 visait les essais de chargement sur les membrures télescopiques. Finalement, la phase 3 devait servir à vérifier le comportement réel d'un ouvrage renforcé, un spécimen grandeur réelle devant être fourni par le ministère des Transports du Québec après avoir mis au point le modèle expérimental.

Le premier article portant sur cette recherche a été présenté en 2006 dans le cadre du XIII<sup>e</sup> Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les ouvrages d'art<sup>1</sup>. L'auteur y expose la problématique ayant amené le ministère des Transports du Québec à entreprendre une recherche dans le domaine et à confier au laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal, la responsabilité de réaliser les essais de chargement. Les résultats de la phase 1 des essais sont présentés dans ce premier article portant essentiellement sur les essais de résistance au glissement et sur les essais de résistance ultime des brides sous l'effet d'une charge inclinée à 45°. Les essais de la phase 2 ont inclus essentiellement des vérifications de résistance ultime en traction et en compression. Quelques essais de chargement cyclique ont aussi été faits. L'essai principal prévu en phase 3 du projet expérimental devait être fait après avoir mis au point un système de chargement permettant de tester un spécimen de grandes dimensions. Une poutre triangulée T3 munie de diagonales de renfort télescopiques devait être testée. Des limitations budgétaires s'imposant, une poutre triangulée devait être récupérée afin de compléter les travaux expérimentaux.

Cette phase finale a pu être amorcée à l'automne 2009, lorsque le Centre de services d'Anjou et du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine a fourni ladite poutre triangulée. Le ministère des Transports du Québec a alors fabriqué les derniers éléments du portique expérimental requis et l'ouvrage a été livré au laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal où l'instrumentation du montage expérimental a été faite afin de procéder à l'essai final en mars 2010. Les résultats de cet essai font l'objet du rapport ST10-06 dont la révision a été complétée récemment.

---

<sup>1</sup> [http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/13colloque/10\\_mai\\_16h30.pdf](http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/Librairie/Publications/fr/ministere/recherche/13colloque/10_mai_16h30.pdf)

Le présent article présente les résultats expérimentaux de ce dernier essai de chargement, réalisé au laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal, et trace un bilan du programme expérimental. On notera que les résultats des essais de la phase 2 sont présentés dans les annexes du rapport ST10-06 et dans la section 6.4 de l'article publié en 2006.

**Figure 1** Portique triangulé type A1 d'usage courant au Québec



Photo : Marcel Vallières, MTQ



Photo : Marcel Vallières, MTQ

Notes :

La section d'une poutre triangulée est définie en fonction de l'entraxe des longerons en sens horizontal et en sens vertical. Ces dimensions correspondent respectivement à la largeur ( $D_x$ ), et à la hauteur ( $D_y$ ), de la poutre triangulée. Le diamètre des longerons varie comme suit : 89 mm pour une poutre A/T1 ; 127 mm pour une poutre B/T2 ; 152 mm pour une poutre C/T3. Les membrures diagonales des poutres triangulées sont assemblées à 45° par rapport aux longerons.

**Tableau 1** Dimensions des poutres triangulées visées par le système de renforcement in situ

Type de poutre triangulée		Dimensions	
Anciens portiques	Nouveaux portiques	$D_x$ (mm)	$D_y$ (mm)
A	T1	914	914
B	T2	1219	1219
C	T3	1524	1524

## **2. SYSTÈME DE RENFORCEMENT IN SITU D'UNE POUTRE TRIANGULÉE**

### **2.1 Caractéristiques de conception et types d'installation**

Le dispositif de renforcement d'une poutre triangulée permet essentiellement d'obtenir une résistance en cisaillement supérieure ou égale à celle qui est disponible à l'état neuf. Cette résistance dépend évidemment de la capacité axiale des diagonales.

Au départ, le système de renforcement a été développé de façon à éliminer les discontinuités structurales parfois présentes aux extrémités de la poutre triangulée. De telles discontinuités entraînent des surcharges importantes sur les longerons et sur les deux dernières diagonales dans chaque face du treillis : une augmentation de contraintes de près de 25 % est possible dans les pires conditions. Ces discontinuités du treillis aux extrémités d'une poutre triangulée s'avèrent souvent le point le plus névralgique de la structure. Les problèmes de discontinuité structurale sont aggravés par l'absence de cales entre les longerons et les poteaux. Des correctifs rapides peuvent être apportés en renforçant in situ les extrémités des poutres.

Compte tenu de la bonne résistance structurale constatée lors des essais sur les brides, le domaine d'utilisation du système peut être élargi en considérant aussi le remplacement d'une diagonale à 45° afin de restituer une bonne résistance à l'ouvrage. Bien entendu, les travaux de renforcement doivent être faits au moment où les conditions environnementales sont favorables.

La diagonale de renfort télescopique est conçue avec une articulation à chaque extrémité de façon à permettre un angle d'installation variant de 45° à près de 90°. Les montages prévus sont montrés aux figures 2, 3 et 4. Les figures 2 et 3 montrent plusieurs détails où des diagonales de renfort à géométrie variable permettant de corriger une discontinuité importante à l'extrémité d'une poutre triangulée; la figure 2 montre les pièces installées en plan horizontal alors que la figure 3 montre celles installées en plan vertical. La figure 4 montre l'installation d'une diagonale de renfort utilisée pour remplacer une membrure diagonale située en travée; cette pièce peut être installée en plan horizontal ou vertical.

### **2.2 Diagonale de renfort télescopique**

La diagonale de renfort télescopique (RT) est conçue de façon à renforcer in situ les poutres triangulées les plus couramment utilisées, soit les poutres A ou T1, B ou T2, C ou T3. Elle doit avoir une résistance supérieure ou égale à l'effort maximal devant être supporté par une diagonale assemblée à 45° dans une poutre existante. La figure 5 présente les détails de la diagonale de renfort télescopique comportant une longue pièce principale RT1 dans laquelle s'emboîte la pièce RT2. Les figures 6 et 7 montrent les détails des assemblages aux extrémités des pièces RT1 et RT2.

Les boulons d'assemblage sont identifiés selon l'ordre de pose de ceux-ci. Les boulons « A » servent à assembler les deux brides aux longerons. On insère ensuite les plaques d'assemblage de la diagonale de renfort télescopique (RT) entre les goussets de chaque bride et on pose un premier boulon « B ». On retire alors la vis de blocage et on ajuste la longueur finale de la pièce afin d'installer le second boulon « B ». L'assemblage final de la pièce RT est complété en utilisant les trous pré-perçés dans la pièce RT1 pour faire les derniers trous dans la pièce RT2 et, finalement, insérer les boulons « C ». La figure 10 montre les détails des différents assemblages.

### **2.3 Brides**

Deux types de brides ont été conçus pour permettre l'installation d'une diagonale de renfort télescopique (RT) : la bride de type 1 pour les petites poutres triangulées et la bride de type 2 pour les poutres triangulées de plus grandes dimensions.

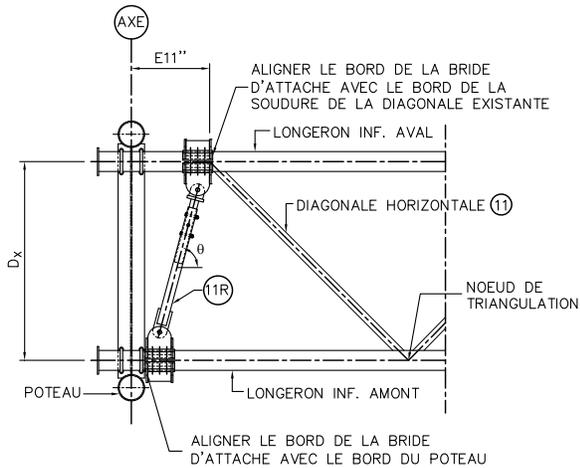
Une préparation des surfaces à mettre en contact est requise avant l'installation de toute bride. La surface du longeron et la surface intérieure de chaque partie de la bride doivent être sablées au papier émeri ; on requiert une rugosité de surface variant entre 7 et 10 microns. Chaque bride est munie de raidisseurs afin de bien répartir les pressions sous l'effet du serrage contrôlé des boulons.

La bride de type 1 est faite d'extrusions identiques à celles qui sont couramment utilisées pour la fabrication des brides d'attache de nombreux ouvrages du Ministère. Compte tenu des dimensions de ces extrusions, seuls des boulons A325 de 16 mm de diamètre sont utilisés dans les assemblages. Comme ce type de bride n'offre que des zones de contact relativement limitées entre la bride et le longeron, les essais de boulonnage réalisés par le Ministère et les essais de résistance au glissement réalisés en laboratoire ont permis d'établir que ces brides ne seront utilisées que pour le renforcement des poutres A et T1.

La bride de type 2 est faite de plaques pliées selon le diamètre extérieur du longeron. Ces plaques sont repliées sur deux bords de façon à pouvoir y insérer une demi-tige en aluminium dont on soude seulement le pourtour. Il s'agit là d'une zone d'appui prévue pour obtenir une assise uniforme pour les têtes de boulons. La bride de type 2 permet d'utiliser des boulons A325 de 19 mm de diamètre. Elle est utilisée pour le renforcement des poutres B, T2, C et T3.

Les figures 8 et 9 montrent respectivement les détails des brides de types 1 et 2. On notera que quatre boulons sont requis dans le cas des brides assemblées aux longerons de 89 mm de diamètre. Dans le cas des longerons ayant un diamètre de 127 mm ou 152 mm, les assemblages requièrent six boulons.

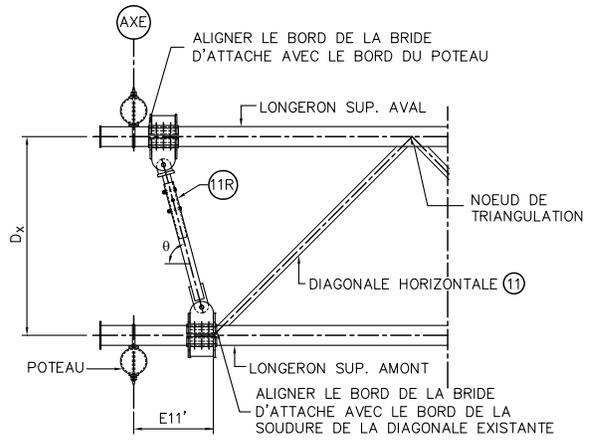
**Figure 2** Installation de deux diagonales télescopiques pour le renforcement en sens horizontal à l'extrémité d'une poutre triangulée en aluminium (portique A1)



**COUPE TYPE**

(VUE EN PLAN INFÉRIEUR)

NOTE : LES DIAGONALES INTERNES NE SONT PAS MONTRÉES.



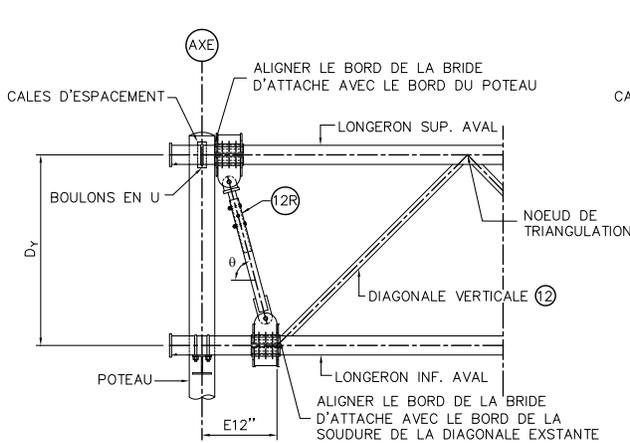
**COUPE TYPE**

(VUE EN PLAN SUPÉRIEUR)

NOTE : LES DIAGONALES INTERNES NE SONT PAS MONTRÉES.

Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

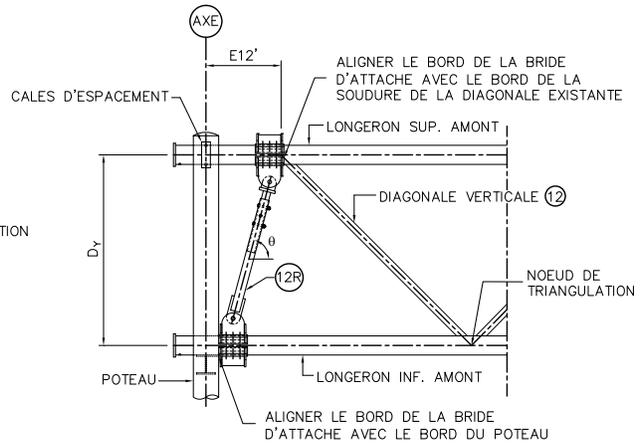
**Figure 3** Installation de deux diagonales télescopiques pour le renforcement en sens vertical à l'extrémité d'une poutre triangulée en aluminium (portique A1)



**COUPE TYPE**

(VUE EN ÉLÉVATION AVAL)

NOTE : LES DIAGONALES INTERNES NE SONT PAS MONTRÉES.



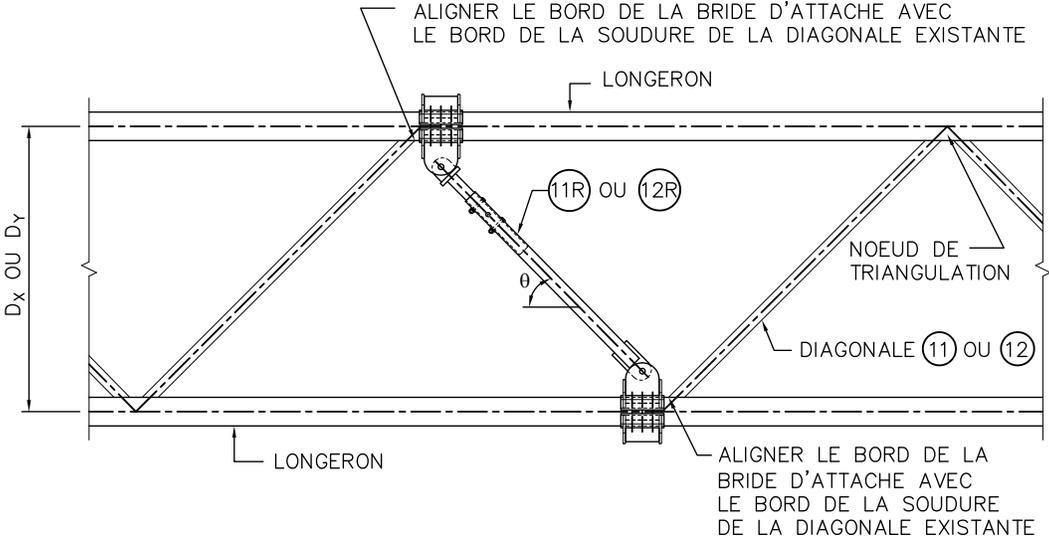
**COUPE TYPE**

(VUE EN ÉLÉVATION AMONT)

NOTE : LES DIAGONALES INTERNES NE SONT PAS MONTRÉES.

Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

**Figure 4** Installation d'une diagonale télescopique pour le remplacement d'une membrure diagonale en travée d'une poutre triangulée en aluminium (portique A1)



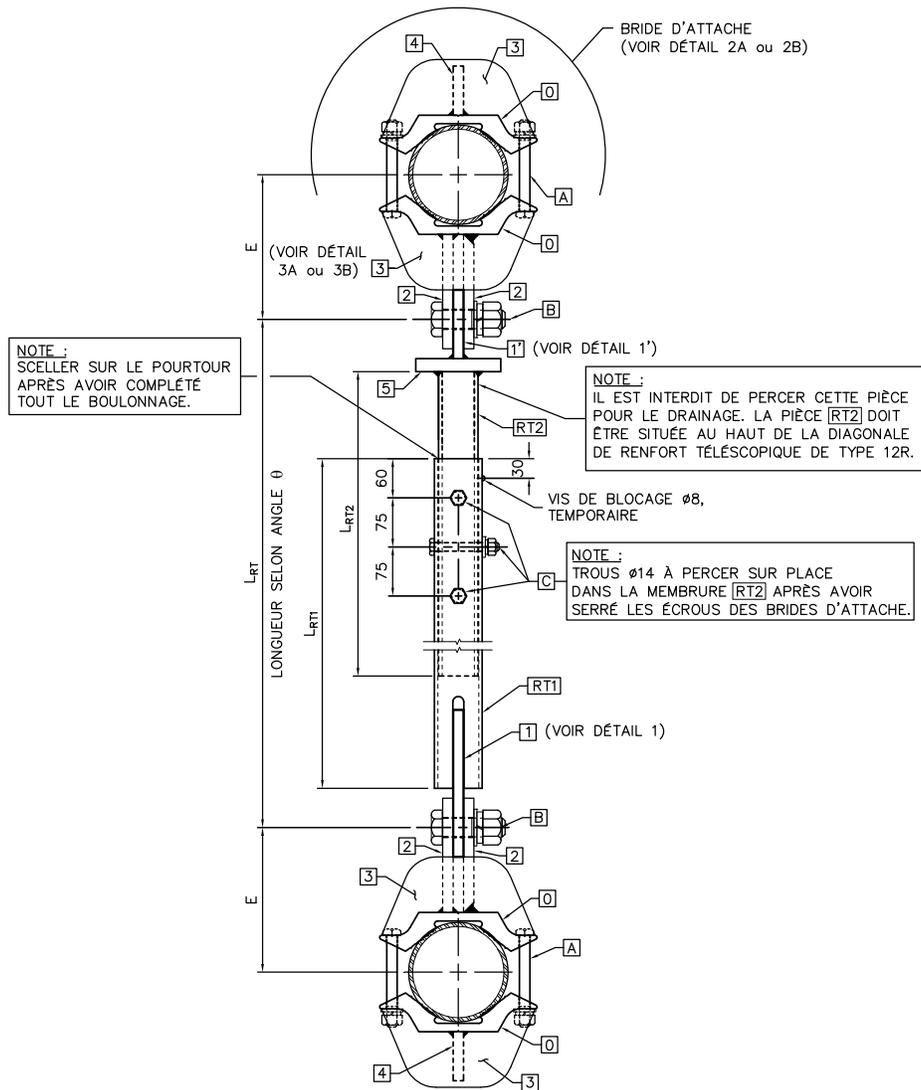
COUPE TYPE

(VUE EN ÉLÉVATION)

NOTE : LES DIAGONALES INTERNES NE SONT PAS MONTRÉES.

Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

**Figure 5** Diagonale de renfort télescopique en aluminium (portique A1)

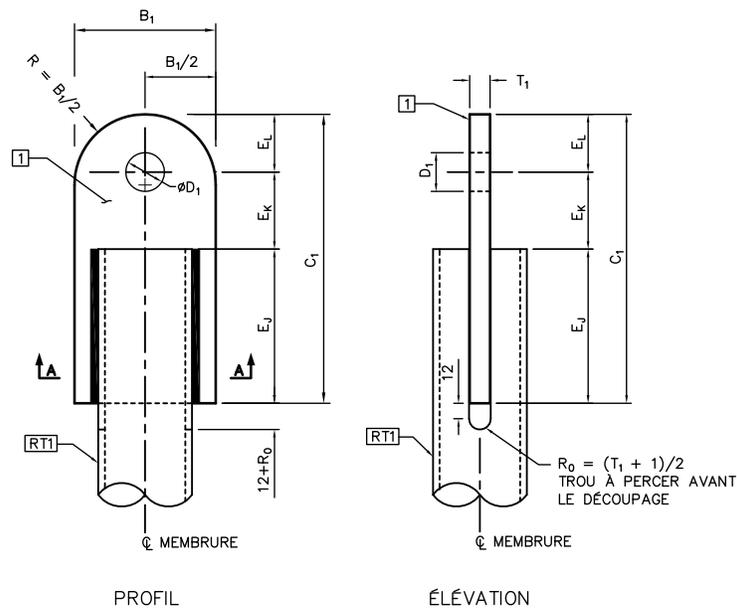


LÉGENDE

NO.	DESCRIPTION	ALLIAGE D'ALUMINIUM
[0]	EXTRUSION (DÉTAIL 2A)	6063-T6
	PLAQUE PLIÉE (DÉTAIL 2B)	6061-T6
[1 ET 1']	PLAQUE D'ANCRAGE	6061-T6
[2]	PLAQUE D'ANCRAGE	6061-T6
[3]	RAIDISSEUR TRANSVERSAL	6061-T6
[4]	RAIDISSEUR LONGITUDINAL	6061-T6
[5]	PLAQUE D'EXTREMITÉ	6061-T6
[6]	TIGE (DÉTAIL 2B)	6061-T6
[RT1]	MEMBRURE PRINCIPALE	6061-T6
[RT2]	MEMBRURE ENCASTRÉE	6061-T6

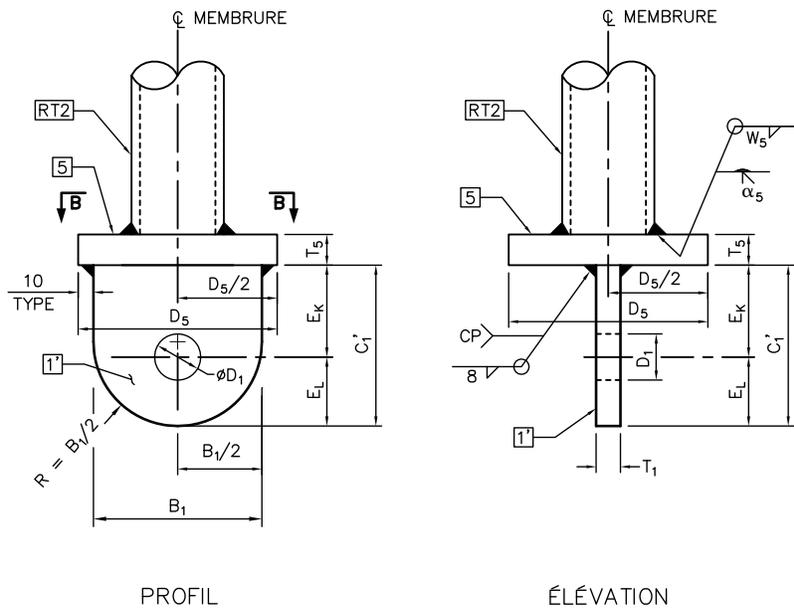
Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

**Figure 6** Diagonale de renfort télescopique – Plaque à l’extrémité de la pièce RT1



Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

**Figure 7** Diagonale de renfort télescopique – Plaque à l’extrémité de la pièce RT2



Concepteur : Marcel Vallières, ing. M. Sc.

**Figure 8** Bride de type 1 – Extrusions – Poutres triangulées A et T1



Vue de profil d'une bride installée sur un longeron de 89 mm D.E. pour poutres A et T1.



Zone d'assemblage où la plaque d'ancrage de la diagonale RT s'insère entre les goussets de la bride afin d'y être boulonnée.



Raidisseur longitudinal avec 2 raidisseurs transversaux – côté opposé aux goussets.



Vue d'ensemble des surfaces discontinues qui seront en contact avec le longeron : ces surfaces sont meulées de façon à épouser la forme cylindrique du longeron.

Photos : Marcel Vallières, MTQ

**Figure 9** Bride de type 2 – Plaques pliées – Poutres triangulées B, T2, C et T3



Vue de profil d'une bride installée sur un longeron de 127 mm D.E. pour poutres B et T2. Le même type de bride est utilisé pour les poutres C et T3.



Zone d'assemblage où la plaque d'ancrage de la diagonale RT s'insère entre les goussets de la bride afin d'y être boulonnée.



Raidisseur longitudinal avec 2 raidisseurs transversaux – côté opposé aux goussets.



Vue d'ensemble : Les plaques pliées offrent une plus grande surface de contact avec le longeron.

Photos : Marcel Vallières, MTQ

### **3. POUTRE TRIANGULÉE RENFORCÉE – PRÉPARATION DU SPÉCIMEN**

Pour la phase finale du programme expérimental, le système de renforcement d'une poutre triangulée au moyen de diagonales de renfort télescopiques devait être testé en simulant les pires conditions possibles pour une structure de signalisation aérienne.

Dès le départ, il avait été prévu de préparer des brides et des diagonales supplémentaires afin de pouvoir faire un essai de chargement sur une poutre triangulée T3 (1524 mm x 1524 mm), laquelle est couramment utilisée dans de nombreux ouvrages présents sur le réseau routier québécois.

À l'automne 2009, un segment intact d'une poutre triangulée T3 a pu être récupéré à la suite du démantèlement d'un ancien ouvrage (S-40490). Dès lors, il devint possible de réaliser les travaux de préparation du spécimen requis afin de vérifier la performance de l'ensemble du système de renforcement.

Afin de simuler le plus fidèlement possible le comportement d'un ouvrage renforcé, le ministère des Transports du Québec a fabriqué un portique expérimental au Centre de services d'Anjou et du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine. La présente section décrit les caractéristiques de l'ouvrage (voir figures 10 et 11). On notera que les détails de la géométrie et des différents assemblages sont présentés dans les plans types PT1A1-01 et PT1A1-02.

#### **3.1 Portique expérimental – Supports verticaux**

Un support vertical standard est constitué de deux poteaux auxquels on soude des membrures transversales et des membrures diagonales formant un treillis constitué principalement de pièces tubulaires à section circulaire, la pièce supérieure du treillis étant toutefois une membrure horizontale à section en I. Cette membrure constitue une poutre d'appui sur laquelle on dépose l'extrémité de la poutre triangulée devant supporter les panneaux de signalisation au-dessus de la chaussée.

Compte tenu de la longueur importante d'une poutre triangulée standard, l'espacement des poteaux d'un support vertical est choisi de façon à laisser une marge de manœuvre suffisante pour permettre de la mettre en place rapidement, lors de l'érection d'une structure. Après avoir déposé la poutre triangulée sur les poutres d'appui, des cales doivent donc être insérées à chaque appui supérieur (assemblage entre un longeron supérieur de la poutre triangulée et le haut d'un poteau). On complète les assemblages aux appuis supérieurs et inférieurs au moyen de boulons en U en acier inoxydable, selon les exigences présentées aux plans types précités.

Les supports verticaux du portique expérimental ont été construits de façon à respecter la géométrie au haut d'un support vertical standard A1-V3, lequel est associé à la poutre triangulée T3. Compte tenu des conditions d'essai aucun treillis n'était requis. Chaque support vertical a donc été fabriqué en assemblant tout simplement une poutre d'appui à deux poteaux. Une plaque est soudée à la base de chaque poteau afin de répartir les pressions, lors de l'essai de chargement.

### 3.2 Portique expérimental – Poutre triangulée

Une poutre triangulée standard est constituée de quatre longerons auxquels on soude des membrures diagonales principales formant un treillis sur les quatre faces de la poutre. Des diagonales internes sont aussi soudées aux longerons. Des cadres de renfort sont présents aux extrémités de chaque segment de la poutre triangulée.

La grande capacité flexionnelle d'une poutre triangulée dépend des caractéristiques des longerons et des distances  $D_x$  et  $D_y$  entre leurs axes. La capacité en cisaillement, selon les deux axes principaux, dépend des caractéristiques des membrures formant les treillis horizontaux et verticaux de la poutre. Compte tenu de la symétrie de la poutre triangulée standard où  $D_x$  est égal à  $D_y$ , la même résistance au cisaillement est disponible selon les axes X et Y de la poutre triangulée ; c'est le cas des poutres A, B, C, T1, T2 et T3.

Les faibles discontinuités permettent d'installer des pièces de renfort ayant un angle variant de  $60^\circ$  à un angle proche de  $90^\circ$ , ce qui permet de limiter la longueur de la diagonale de renfort télescopique pouvant être installée. Une telle pièce est moins sujette au flambement.

Évidemment, pour une pièce formant un angle variant de  $45^\circ$  à  $60^\circ$ , la longueur de flambement augmente et la capacité disponible peut être plus limitée.

Compte tenu du grand nombre de cas devant être pris en compte, on choisit l'angle le plus critique possible pour faire l'essai final. De plus, la pire condition est considérée en supposant une rupture complète des deux diagonales amont et aval à l'extrémité d'une poutre triangulée, là où le cisaillement est maximal ; les mêmes conditions pourraient être considérées en sens horizontal, mais l'essai de chargement ne pourrait pas être réalisé aussi aisément. C'est donc en sens vertical que les charges seront appliquées en laboratoire.

Afin de simuler des dommages importants à l'extrémité d'une poutre triangulée, deux diagonales de la poutre T3 sont enlevées dans les plans verticaux amont et aval. Après avoir meulé les résidus des assemblages soudés, il faut ensuite préparer la surface sur laquelle on doit assembler une bride. Les surfaces des longerons sont sablées selon les conditions établies lors de la phase 1 du programme expérimental, une bonne rugosité de surface (voir section 2.3) permettant d'obtenir la résistance maximale au glissement. On assemble ensuite les paires de brides requises pour chaque diagonale de renfort télescopique (RT).

**Figure 10** Portique expérimental – Poutre triangulée T3 renforcée à une extrémité



Bride de type 2 installée sur le longeron supérieur d'une poutre T3 – Longeron 152 mm D.E.

La plaque d'ancrage de la pièce RT2 est boulonnée aux goussets de la bride.



Bride de type 2 installée sur le longeron inférieur d'une poutre T3 – Longeron 152 mm D.E.

La plaque d'ancrage de la pièce RT1 est boulonnée aux goussets de la bride.



Étape finale – Les trous à l'extrémité de la pièce RT2 sont utilisés comme gabarit de percement de la pièce RT2.



Vue d'ensemble d'une diagonale de renfort télescopique (RT).

Photos : Marcel Vallières, MTQ

**Figure 11** Portique expérimental – Poutre triangulée T3 renforcée à une extrémité



Support vertical spécial - Axe 2

- Appui non standard pour une poutre triangulée.
- La poutre triangulée est assemblée ainsi afin de pouvoir installer adéquatement les boulons en U sans avoir à couper une pièce.

Support vertical spécial - Axe 1

- Appui standard pour une poutre triangulée.
- La poutre triangulée est renforcée à l'extrémité au moyen de deux diagonales de renfort télescopiques.

Collaboration : Alexandre Morin, MTQ  
Michel Labonté, MTQ

## **4. ESSAIS EN LABORATOIRE**

Le volet expérimental de la recherche relève de l'équipe du laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal, sous la responsabilité de M. Bruno Massicotte, ing. Ph. D.

L'étape finale du projet de recherche vise à vérifier l'efficacité de l'ensemble du système de renforcement installé dans un segment d'une poutre triangulée.

### **4.1 Modèle et montage expérimental**

Un chargement très important doit être appliqué de façon à générer un grand effort de cisaillement vertical dans la zone renforcée de la poutre triangulée. Pour ce, on considère un modèle où deux charges ponctuelles sont appliquées progressivement sur la poutre triangulée. Selon la géométrie choisie, les réactions d'appui à l'extrémité la plus chargée devraient correspondre à 86 % des charges ponctuelles appliquées. En installant des vérins sous chacun des poteaux du portique et en rattachant deux nœuds au plancher au moyen de barres Dywidag, on arrive à simuler un tel chargement. Le modèle théorique est illustré à la figure 12.

La vue d'ensemble du montage est montrée dans la figure 13. Chaque poteau est appuyé sur un vérin de forte capacité. Chaque support vertical exercera une poussée vers le haut sous la poussée des vérins. L'extrémité renforcée du portique expérimental se situe en avant-plan. C'est là que toute l'instrumentation requise est installée. La figure 14 montre une vue d'ensemble des différents éléments. Les figures 15 et 16 présentent quelques détails supplémentaires.

### **4.2 Chargement**

Le chargement du portique expérimental doit s'appliquer progressivement à l'aide de chaque paire de vérins. On exerce donc une poussée à un support vertical puis à l'autre en utilisant des incréments de charges de 50 kN jusqu'à l'atteinte de la rupture.

La figure 17 présente l'historique de chargement s'étendant sur plus d'une heure. L'ordonnée de ce graphique présente la progression de la charge totale appliquée au spécimen. Cette charge totale correspond à la somme des charges ponctuelles générées par l'ensemble des barres Dywidag utilisées pour ancrer les deux nœuds critiques.

### **4.3 Résistance ultime et analyse des résultats**

Au départ, le but recherché était de développer un système de renforcement ayant une capacité totale supérieure ou égale à celle qui est disponible pour une poutre triangulée existante comportant des diagonales soudées. Le niveau de chargement requis pour développer la pleine capacité procurée par lesdites diagonales soudées est de 162 kN, ce qui est déjà largement supérieur à l'effort de cisaillement qui serait normalement considéré à l'extrémité d'une poutre triangulée.

Les efforts qui sont générés dans les diagonales de renfort télescopiques (RT), sous l'effet combiné des vérins et des barres Dywidag utilisées pour ancrer les deux nœuds critiques, créent une tension dans la diagonale RT située à l'Est et une compression dans celle qui est située à l'Ouest.

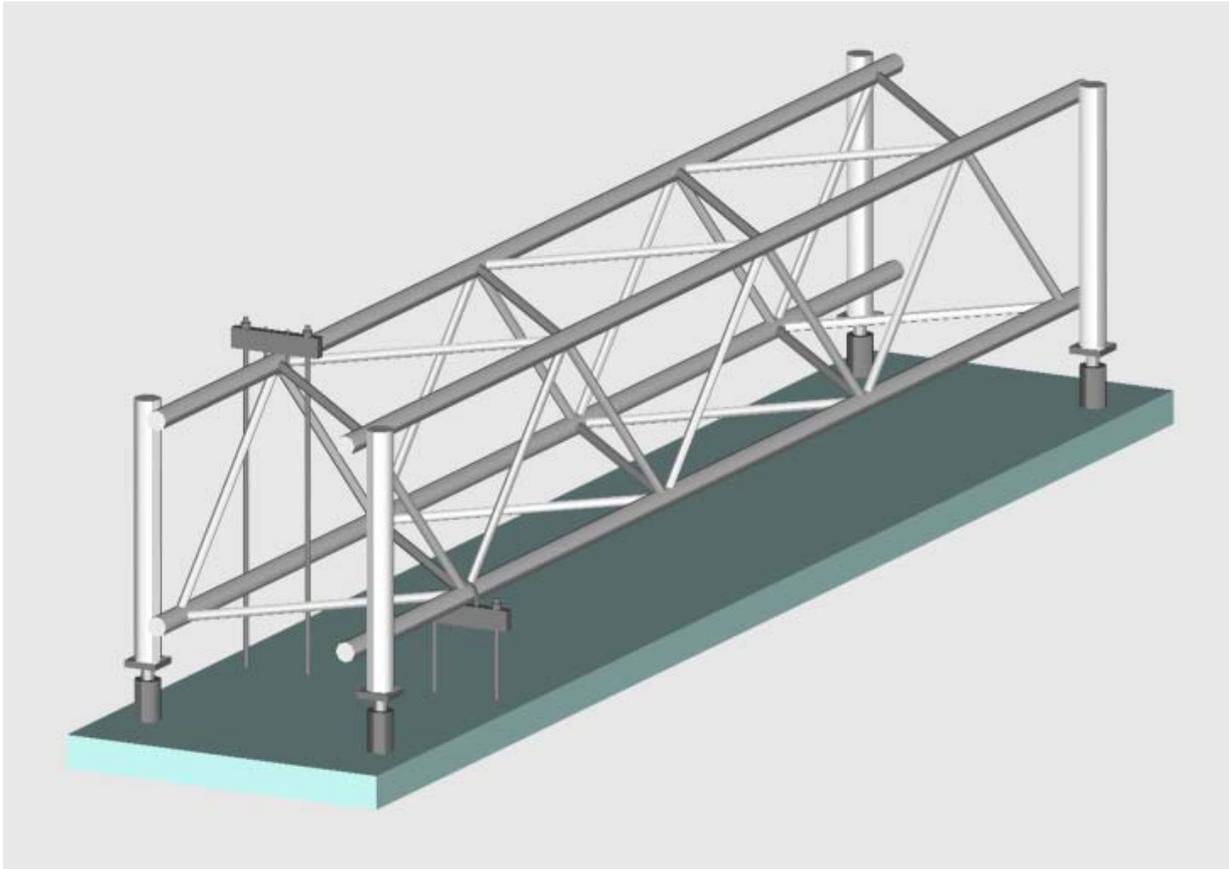
Le chargement se poursuit jusqu'à l'atteinte de la rupture complète de la diagonale comprimée. Une amorce de fissuration est aussi constatée dans la diagonale tendue.

Les résultats obtenus montrent que la résistance ultime est atteinte pour une charge de 274 kN. Une déformation relativement importante est constatée (voir figures 18, 19 et 20). Les résultats obtenus nous indiquent que le montage expérimental choisi a permis de générer des charges pratiquement égales à chaque nœud retenu, une faible différence de quelques kilo-Newtons étant observée (voir figure 20).

La rupture par flambement de la diagonale de renfort télescopique est montrée à la figure 21. On y constate le voilement local de la pièce RT2 s'encastant dans la pièce RT1. Compte tenu de la facilité de découpage de l'aluminium in situ, on pourrait augmenter légèrement la capacité au flambement de la pièce en augmentant la longueur de la pièce principale RT1. Cela pourrait être considéré si une diagonale à 45° devait être remplacée.

La charge ultime obtenue est certainement beaucoup plus élevée que celle qui aurait été tolérée sur un ouvrage réel. Une déformation importante de plusieurs éléments a d'ailleurs été constatée lors de l'essai, ce qui incluait une forte déformation des longerons et même, de la semelle supérieure de la poutre d'appui ; la figure 22 illustre bien l'importance des déformations à l'appui. D'ailleurs l'examen du spécimen a permis de constater que dans ces conditions, il y a relâchement de la tension dans les boulons en U sous l'effet de l'ovalisation du longeron, ce qui n'est jamais observé en pratique.

**Figure 12** Schéma du montage en 3D – Poutre triangulée T3 renforcée à une extrémité



Support vertical spécial - Axe 1

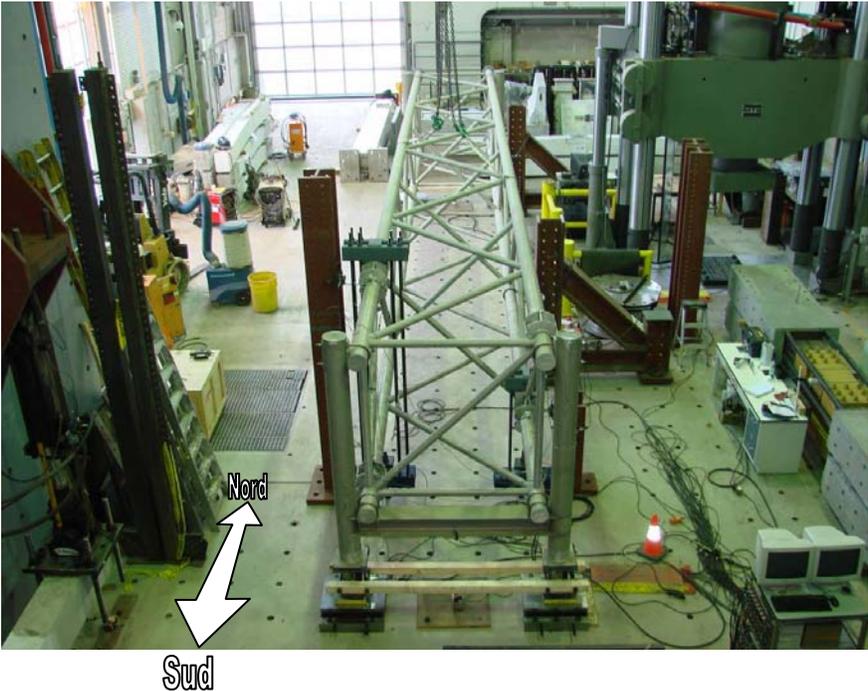
- Appui standard pour une poutre triangulée.
- La poutre triangulée est renforcée à l'extrémité au moyen de deux diagonales de renfort télescopiques.
- Des barres Dywidag sont utilisées pour ancrer la poutre triangulée au plancher.
- Des vérins sont installés à la base de chaque poteau du support vertical d'axe 1.

Support vertical spécial - Axe 2

- La figure ci-dessus a été préparée avant la fabrication du portique expérimental.
- La figure ne montre pas l'appui non standard utilisé pour l'assemblage de cette extrémité peu chargée de la poutre triangulée.
- Des vérins sont installés à la base de chaque poteau du support vertical d'axe 2.

Illustration : Rapport ST10-06  
Laboratoire de Structures de  
l'École Polytechnique de Montréal

**Figure 13** Vue d'ensemble du montage – Poutre triangulée T3 renforcée à une extrémité



**Figure 14** Diagonales de renfort télescopiques près de l'axe 1 (Sud), vérins et barres Dywidag



**Figure 15** Diagonales de renfort télescopiques et barres Dywidag



Vue du côté Ouest

- Diagonale de renfort télescopique.
- Barres Dywidag exerçant une retenue au nœud supérieur.



Vue du côté Est

- Diagonale de renfort télescopique.
- Barres Dywidag exerçant une retenue au nœud inférieur.



Vue du côté Ouest – Détail.



Vue du côté Est – Détail.

Photos : Marcel Vallières, MTQ

**Figure 16** Montage expérimental – Détails de l'instrumentation des pièces



Vue d'ensemble du montage incluant les deux diagonales de renfort télescopique, les quatre brides et les deux groupes de barres Dywidag.



Assemblage par chevauchement et boulonnage – Instrumentation de la pièce RT1 de la diagonale de renfort télescopique.



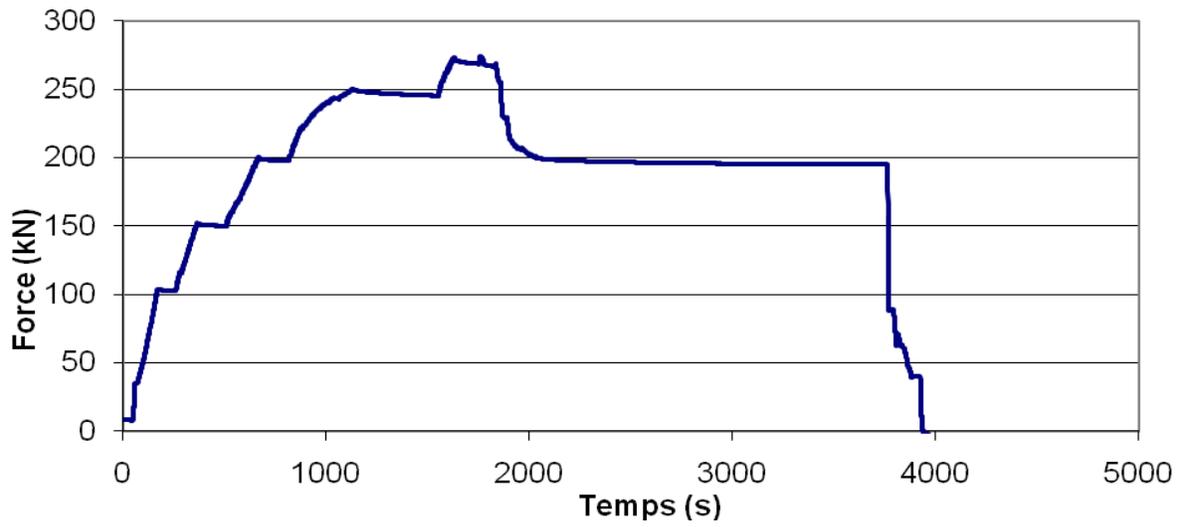
Bride assemblée sur le longeron supérieur près de l'assemblage longeron- poteau.



Bride assemblée sur le longeron inférieur près de l'assemblage longeron- barres Dywidag (côté Est).

Photos : Marcel Vallières, MTQ

**Figure 17** Historique de chargement



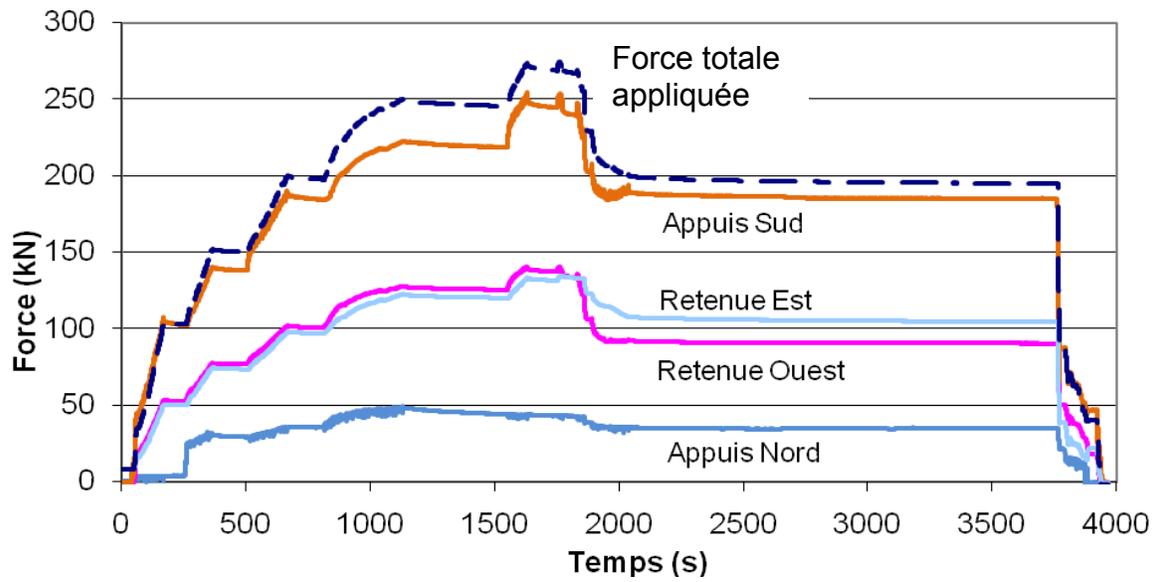
Rapport ST10-06  
Laboratoire de Structures de  
l'École Polytechnique de Montréal

**Figure 18** Réponse globale de la structure

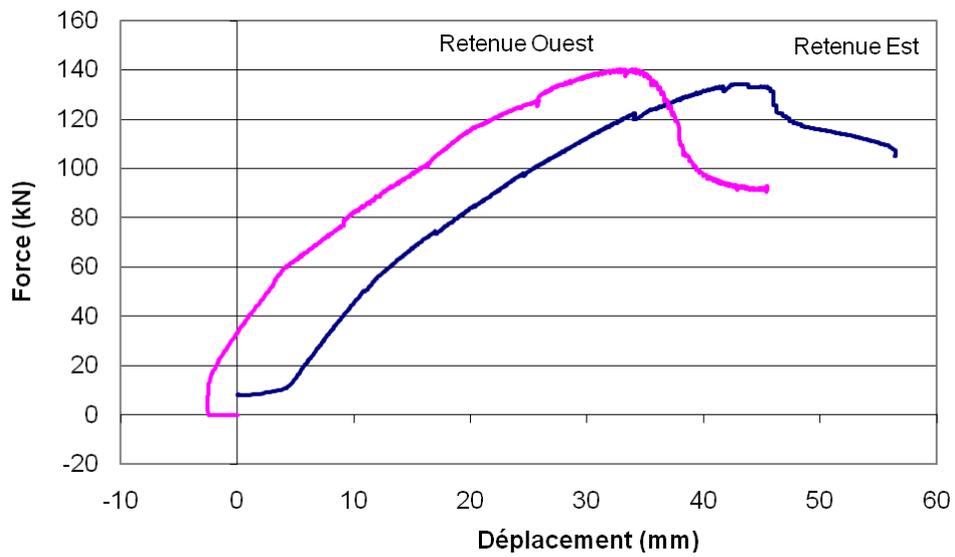


Rapport ST10-06  
Laboratoire de Structures de  
l'École Polytechnique de Montréal

**Figure 19** Historique de forces appliquées et des réactions



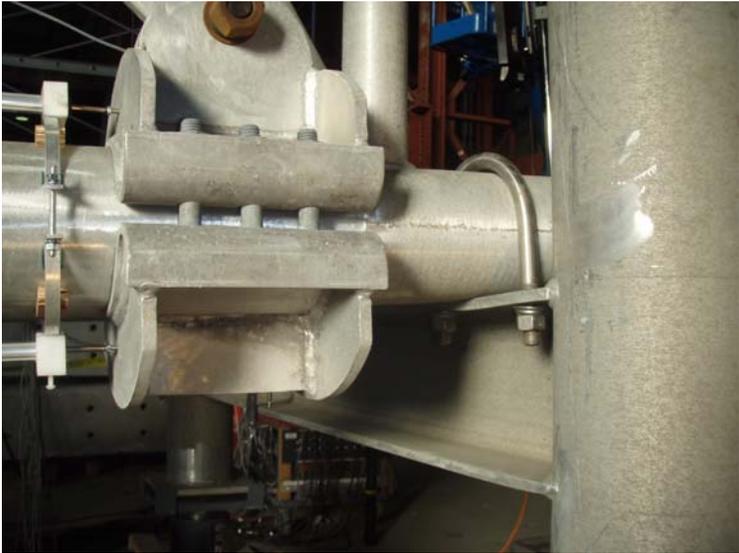
**Figure 20** Réponse locale



**Figure 21** Diagonale de renfort télescopique – Rupture par flambement



**Figure 22** Appui inférieur – Ovalisation du longeron et déformation de la semelle supérieure de la poutre d'appui



Photos : Marcel Vallières, MTQ

## **CONCLUSION**

Le renforcement d'un portique de signalisation aérienne demande généralement le démontage de l'ouvrage afin de le transporter jusqu'à un atelier de réparation. En plus d'être coûteux et d'entraver la circulation, ce type d'intervention requiert aussi une solution temporaire pour le maintien de la signalisation. On pourrait devoir remplacer la poutre triangulée défectueuse par une autre poutre dont la géométrie ne correspondrait pas nécessairement à celle de la poutre existante.

Dans chaque cas, un système de renforcement in situ des portiques de signalisation aérienne au moyen de diagonales de renfort télescopiques en aluminium permettrait de solutionner un important problème d'entretien de ces ouvrages.

Les essais réalisés en phases 1 et 2 permettent de constater que la capacité structurale des différentes pièces est adéquate. L'essai final de la phase 3 du programme expérimental permet de valider les premiers résultats obtenus en démontrant le bon comportement structural de l'ensemble du système de renforcement in situ au moyen de diagonales de renfort télescopiques et ce, en le testant dans les pires conditions possibles.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à souligner l'excellente collaboration de nombreux intervenants du ministère des Transports du Québec. Il y a lieu de remercier tout particulièrement M. Michel Labonté, inspecteur en métallurgie, pour sa précieuse collaboration au projet de recherche, de même que son supérieur, M. Donald Villeneuve, ing., (section métallurgie de la Direction du laboratoire des chaussées) pour son soutien. On remercie aussi MM. Pierre Royer, contremaître et Stéphane Carignan, soudeur (Centre de services de Québec), de même que MM. Yves Trudelle, contremaître et Alexandre Morin, soudeur (Centre de services d'Anjou et du tunnel Louis-Hippolyte-La Fontaine), pour leur apport particulièrement important au projet, les brides étant fabriquées à Québec et les diagonales de renfort étant fabriquées à Montréal, là où le montage final a été fait en atelier avant d'être livré au laboratoire de Structures de l'École Polytechnique de Montréal.

Les auteurs tiennent aussi à féliciter l'équipe de l'École Polytechnique de Montréal menée par M. Bruno Massicotte, ing. Ph. D., assisté de M<sup>me</sup> Kathleen Moffatt, ing. M. Sc. A., de MM. Viacheslav Koval, ing. M. Sc. A. et Guillaume Cossette, ing. jr, l'équipe étant responsable du volet expérimental de la recherche.

Finalement, les auteurs tiennent à souligner l'excellence du travail accompli par M<sup>mes</sup> Claudine Robitaille, t.t.p. et Claudie Bélanger, a.s. (Direction des structures), dans la préparation des documents émis dans le cadre du projet de recherche.

## RÉFÉRENCES

BEAULIEU, Denis, 2003, *Calcul des charpentes d'aluminium*, Les Presses de l'aluminium PRAL.

CAN/CSA-S6-00, 2006, Association canadienne de normalisation, *Code canadien sur le calcul des ponts routiers*.

MASSICOTTE, Bruno, MOFFATT, Kathleen, nov. 2004, *Conception et réparation des structures de signalisation aérienne en aluminium – Phase 1 / Rapport d'étape, Essais de brides – Frottement*, Projet CDT / Rapport ST04-05, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

MASSICOTTE, Bruno, KOVAL, Viacheslav, COSSETTE, Guillaume, juil. 2010/rév. Mars 2011, *Conception et réparation des structures de signalisation aérienne en aluminium – Phases 2 et 3 / Rapport final – Essai de validation sur une poutre triangulée*, Projet CDT / Rapport ST10-06, Département des génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.

VALLIÈRES, Marcel, 2006, *Système de renforcement in situ des portiques de signalisation aérienne – Diagonales de renfort télescopiques en aluminium*, Direction des structures, Ministère des Transports du Québec.