



# Structures de scènes en aluminium extrudé

Louis Larouche

13 février 2020

## Structures en aluminium extrudé

### 1. Introduction

Ce document est rédigé à l'intention des ingénieurs non-initiés aux avantages liés à l'utilisation d'éléments structuraux faits avec le matériau aluminium. Vous y trouverez des exemples concrets d'utilisation de ce matériau, les paramètres ayant servis à des conceptions structurales, ainsi que les éléments disponibles dans la norme CAN/CSA S157-17 pour réaliser ces conceptions.

Il est à noter que le document ne traite pas de tous les aspects de l'aluminium, notamment la résistance à la corrosion ou les assemblages de pièces. Il permet plutôt au lecteur de s'initier au dimensionnement d'éléments structuraux en aluminium.

#### 1.1. Comparaison entre l'acier et l'aluminium

La comparaison entre l'acier et l'aluminium est inévitable puisque les deux matériaux sont souvent appelés à jouer des rôles similaires. Bien que leurs résistances ultimes puissent être comparables sous certaines conditions, leur comportement est très différent.

Le module d'élasticité de l'aluminium étant le tiers de celui de l'acier, les déformations élastiques lors de l'application des charges sont évidemment supérieures à celles d'une charpente en acier dont les éléments ont les mêmes propriétés géométriques telle que l'inertie des sections. Ainsi le personnel travaillant sur les chantiers, possédant généralement une expérience plus vaste d'utilisation d'éléments de structures en acier, peut considérer cet état de déformation élastique non sécuritaire. Mais, si on adapte les dimensions de l'élément sollicité en aluminium, alors le niveau de flèche devient similaire à la pièce en acier. Nous recommandons donc d'indiquer sur les plans les déformations théoriques prévues pour éviter les craintes inutiles.

Notons que la masse volumique de l'acier est de 7800 kg/m<sup>3</sup> et celle de l'aluminium 2700 kg/m<sup>3</sup>, ce qui fait en sorte que ce dernier est presque 3 fois plus léger.

La ductilité étant un des principes fondamentaux d'une bonne conception structurale, la capacité de déformation supplémentaire d'une charpente en aluminium par rapport à l'acier nous semble plutôt un avantage.

Il est possible de réaliser un premier dimensionnement sécuritaire approximatif de profilés extrudés en aluminium à partir de facteurs de substitution par rapport aux profilés d'acier. On peut donc faire une première conception en acier et utiliser les facteurs suivants pour obtenir l'équivalence en aluminium selon le cas<sup>1</sup> afin de compenser le module de Young plus faible de l'aluminium :

$$\frac{Inertie_{Al}}{Inertie_{Acier}} = 3$$

---

<sup>1</sup> Alcan Canada, Construire en Aluminium, 1970

En considérant la densité plus faible de l'aluminium, une économie minimale de 50% du poids est réalisée lors de la substitution de l'acier par de l'aluminium<sup>2</sup>. Enfin, le prix d'un kilo d'aluminium est approximativement trois fois plus élevé qu'un kilo d'acier (4,50\$ comparativement à 1,50\$)<sup>3</sup>.

## 2. Rôle de l'aluminium dans les structures utilisées pour les grands évènements extérieurs

L'aluminium se distingue par une excellente résistance à la corrosion, une remarquable légèreté, les formes variées d'extrusions qui sont illimitées et sa bonne résistance structurale.

Il y a une multitude de types de structure en aluminium construite pour des usages variés. On y retrouve des scènes extérieures, des supports pour suspendre de l'éclairage, des tentes, des plateformes, etc. Ces structures sont, la plupart du temps, construites avec des ponts triangulés amovibles et des tubes renforcés ou non.

La légèreté de l'aluminium est un avantage important à considérer dans la gestion des coûts de manipulation et de transport. À cet égard, il constitue donc un choix judicieux.

Également, la facilité d'extruder des profilés répondant à différentes exigences selon des formes adaptées à toutes les situations, confère à ce matériau des avantages non négligeables. Dans les faits, les seules limites liées à l'usage de l'aluminium sont l'imagination et la créativité.

### 2.1. Exemples de type d'utilisation

Nous avons regroupé en trois groupes, les quelques utilisations étudiées: le premier groupe est composé de différentes charpentes réalisées avec des ponts d'éclairage standardisés qu'il est possible de louer ou d'acheter directement des fabricants. Le deuxième groupe comprend différents modèles de tentes amovibles pouvant être facilement assemblées grâce à la légèreté de l'aluminium. Le dernier groupe est formé d'œuvres artistiques extérieures (sculptures) qui mise sur la durabilité, la bonne apparence esthétique et la résistance élevée du matériel aluminium. Tous ces éléments ont été fabriqués au Québec.

#### 2.1.1. Structure de support fabriquée avec ponts d'éclairages

Lors de la tenue d'événements publics extérieurs ou intérieurs, la construction d'arches haubanées avec des ponts d'éclairage préfabriqués avec des tubes en aluminium constitue un usage économique et flexible.

La figure 1 présente une charpente en aluminium 6061-T6 triangulée en profilés extrudés installée verticalement afin de permettre l'installation d'écrans et de projecteurs pour produire des effets visuels. Afin d'assurer la stabilité latérale, on remarque la présence de haubans reliés à des blocs de béton.

---

<sup>2</sup> Beaulieu, Calcul des charpente d'aluminium, 2003 Les Presses de l'Aluminium, Qc, Canada

<sup>3</sup> Indices DownJones, 2018



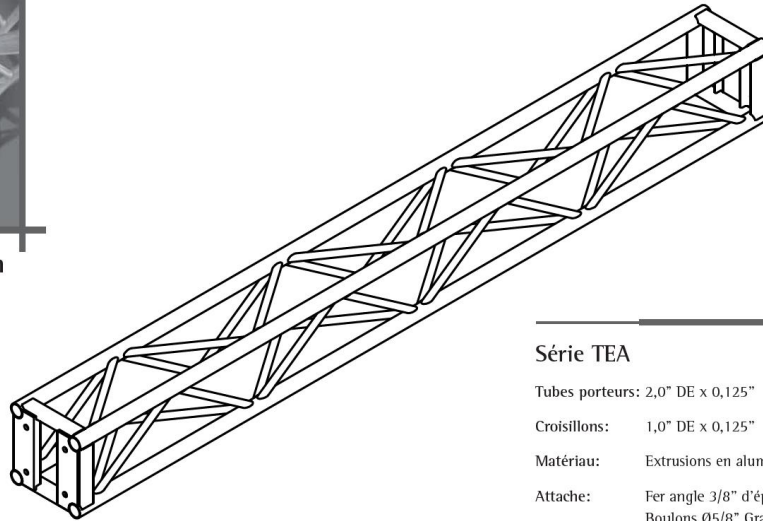
*Figure 1 - Pont d'éclairage vertical haubané  
(Gracieuseté de L. Larouche)*

Plusieurs fabricants produisent ces structures triangulées à l'aide de tubes en aluminium 6061-T6 de diamètres situés entre 25 et 50 mm et des épaisseurs allant 1,5 à 3 mm.

Les dimensions hors-tout varient de 300 mm x 300 mm jusqu'à 1000 mm x 1000 mm. La figure 2 illustre le modèle de triangulation habituellement utilisé.



www.arcofab.com



#### Série TEA

Tubes porteurs: 2,0" DE x 0,125"

Croisillons: 1,0" DE x 0,125"

Matériau: Extrusions en aluminium 6061-T6

Attache: Fer angle 3/8" d'épais  
Boulons Ø5/8" Grade 8

Fabrication: Fabriqué par des soudeurs certifiés

Figure 2 - Triangulation usuelle pont d'éclairage standardisé  
(extrait : Catalogue Arcofab)

La photo de la figure 3 a été prise dans le cadre du Festival d'été de Québec. Un cadre rigide (arche) de 8 mètres de largeur et de 5 mètres de hauteur est construit avec des ponts d'éclairage assemblés mécaniquement.

Les ponts triangulés structuraux forment une arche et peuvent être recouverts de toiles et de divers pavoisements selon les exigences esthétiques de l'évènement. Ils peuvent également supporter un écran vidéo visant à diffuser des informations aux festivaliers en temps réel.

Les ponts utilisés sur la figure 3 sont construits d'éléments en aluminium 6061-T6 avec des tubes variant de 25 à 50 mm de diamètre et d'une épaisseur de 2 mm. Le pont triangulé a une dimension extérieure de 400 mm x 400 mm et sa base est stabilisée avec 3 blocs de béton 1500 kg de chaque côté.

L'écran possède une dimension de 1,2 m x 3 m et pèse approximativement 400 kg. Les blocs de béton assurent une stabilité au renversement pour contrebalancer une pression de vent de 1 kPa.



Figure 3 - Arche de pavoiement  
(Gracieuseté de L. Larouche)

La figure 4 montre une plate-forme surélevée dont la charpente principale est formée de ponts d'éclairage préfabriqués.

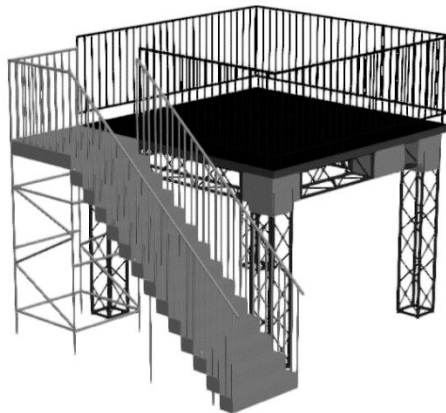
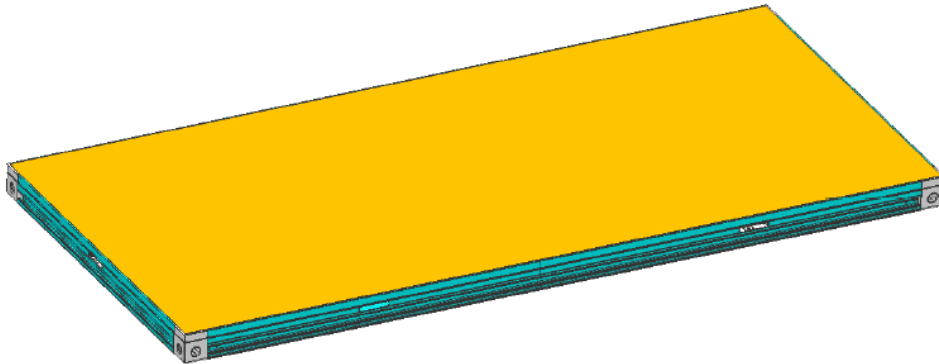


Figure 4 - Plateforme surélevée  
(Gracieuseté de Scapin)

Le plancher de cette plate-forme est construit avec des panneaux de plancher de scène, illustrés à la figure 5, composés d'extrusions en aluminium recouvertes d'un contreplaqué. Ces panneaux sont assemblés les uns aux autres au moyen des extrusions de rive reliées ensemble avec des barrures (rotolock MD).



*Figure 5 - Panneau préfabriqué 1220 x 2440 mm  
(Gracieuseté de Scapin)*

Ces panneaux de plancher sont construits avec des profilés extrudés de 75 mm de profondeur en alliage 6061-T6 et 6005-T5. Ils supportent une charge vive de 4,8 kPa.

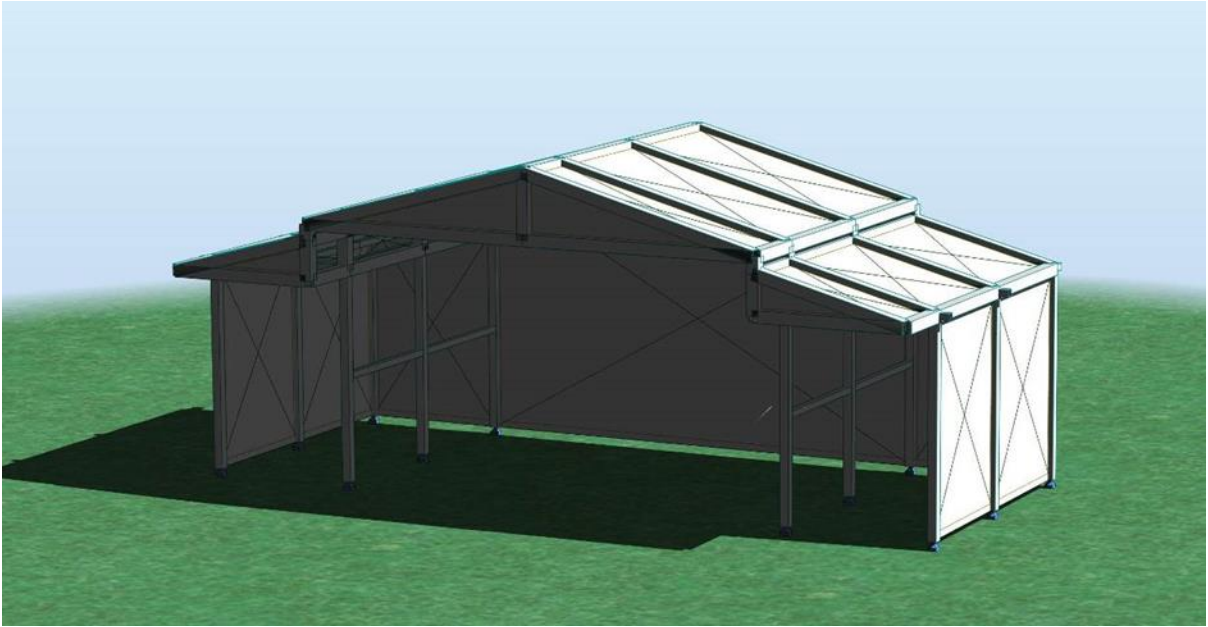
La plate-forme de la figure 4 a une hauteur de 2 mètres et une superficie de 3m x 3m. Elle peut être utilisée par un animateur de foule avec de la musique (DJ) tout en étant située au-dessus de celle-ci.

Elle est construite avec des ponts triangulés préfabriqués de dimensions 300mm x 300mm et supporte une charge vive de 4,8 kPa.

Puisqu'elle est située à l'intérieur, une force de succion 0,5 kPa est appliquée. Sa surface d'exposition étant faible, sa stabilité latérale est assurée par le module de l'escalier et la rigidité des encastremets entre les ponts colonnes et les poutres.

La figure 6 illustre une scène extérieure dont la charpente est fabriquée avec des ponts triangulés avec des tubes en aluminium. Des toiles y sont ajoutées afin de protéger les artistes et les équipements des intempéries lors des spectacles se déroulant à l'extérieur. (Festival de Jazz, Festival d'été de Québec, etc.)

Ces tentes géantes installées pour protéger la scène, ont des dimensions variables pouvant aller jusqu'à une hauteur de 10 mètres et une largeur de 60 mètres. Les ponts d'aluminium qui la composent sont généralement haubanés et munis de contrepoids en béton (ballasts) afin de résister aux forces horizontales de vent.



*Figure 6 - Scène extérieure  
(Gracieuseté de L. Larouche)*

Généralement les charges s'appliquant sur cette scène sont de 4,8 kPa sur le plancher, 1,9 kPa sur la toiture représentant le système d'éclairage accroché au toit. Une charge de vent de 1 kPa est également considérée.

Le contreventement et l'effet diaphragme sont produits par des câbles toronnés en croix ayant 8 mm de diamètre.

La charpente principale est réalisée avec des ponts triangulés de dimensions 300mm x 300mm composés de tubes de 50mm de diamètre en aluminium 6061-T6. Des contrepoids (blocs de béton) de 40 000 kg sont requis pour produire une résistance adéquate à la base de la scène (généralement cachés sous le plancher).

#### 2.1.2. Tentes amovibles

La construction d'un abri en forme de dôme est nécessaire dans le cadre des festivités, notamment au Carnaval de Québec. La légèreté de l'aluminium permet d'ériger facilement la structure de support de la toiture formée de tubes 30mm x 75mm en aluminium 6061-T6. On construit alors un dôme de 3 mètres de diamètre pouvant résister à une charge de vent de 1kPa et une charge de neige 2,8 kPa. (Figures 7 et 8 – tente amovible).





Figure 7 - Montage d'une tente amovible  
(Gracieuseté de L. Larouche)



Figure 8 - Tente montée  
(Gracieuseté de L. Larouche)

### 2.1.3. Chapiteau de style Parabris

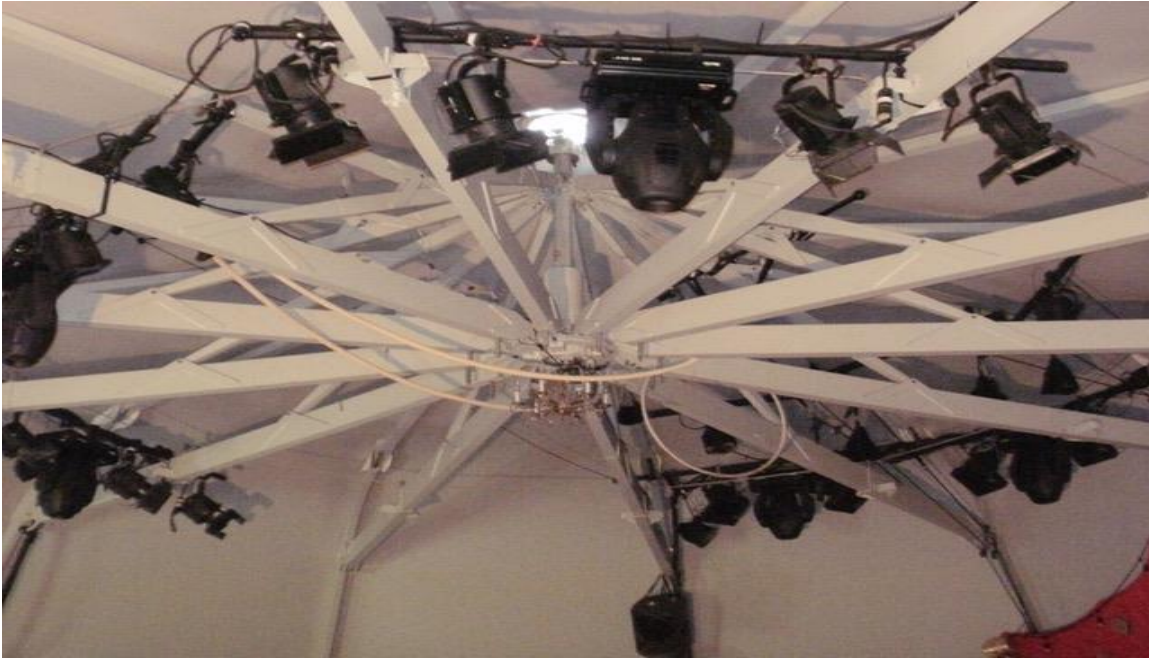
Plusieurs modèles de chapiteau avec charpente en aluminium, donc facilement montables et démontables, peuvent accueillir jusqu'à 300-400 personnes. La figure 9 illustre un chapiteau de style Parabris ayant 15 mètres de diamètre et une hauteur libre de 4,3 mètres à l'intérieur. Ce modèle de chapiteau n'a aucun mât central afin d'éviter de bloquer la vue des spectateurs. Le concept audacieux des tentes Parabris (principe du parapluie), la légèreté et la haute résistance de l'aluminium permettent de répondre aux défis de délais et espaces réduits typiques des grands événements extérieurs.

La charpente est construite avec des extrusions en aluminium 6061-T6 de 150mm x 50mm. Une dizaine de cloches de béton de 340 kg (750 lbs) chacune assurent la stabilité latérale à une pression de vent de 0,75 kPa.



*Figure 9 - Chapiteau style Parabris 4,3 mètres de hauteur  
(Gracieuseté de L. Larouche)*

Il est également possible de suspendre environ 115 kg (250 lbs) d'équipement au sommet intérieur du chapiteau (Voir la figure 10).



*Figure 10 - Tente Parabris 15 mètres de hauteur  
(Gracieuseté de L. Larouche)*

#### 2.1.4. Biome Canada – support d’une tente en forme de goutte d’eau

Depuis l’été 2018, il est possible dans certains parcs nationaux du Canada de dormir dans une tente en forme de goutte d’eau, (Figure 11) surélevée par rapport au sol. L’aménagement intérieur de la tente permet d’accueillir trois personnes (1,5 kN chacune) et prévoit la présence d’une personne supplémentaire dans le cas de besoin en soin d’urgence.

Cette tente a un diamètre de 2,5 mètres et est fixée sur un support en aluminium de 1,85 mètres de hauteur. L’ensemble doit résister à une pression du vent de 0,75 kPa.



*Figure 11 - Portion supérieure de la tente en forme de goutte d'eau  
(Gracieuseté de Biome Canada)*

L'ossature de la tente est formée de profilés en aluminium rectangulaire de 50mm x 75 mm.

La tente en forme de goutte repose sur une structure en aluminium cintrée de 1,85 mètres de hauteur par 3 mètres de largeur. Elle est construite avec des tubes en aluminium ronds de 75 mm de diamètre cédule 40 (dans le cas d'un tube 75mm, la cédule 40 précise une épaisseur de paroi .216 po. soit 5,5 mm) à partir d'un alliage du type 6061-T6. (Voir fig.12)

Les appuis (4 pattes) de ce support peuvent être fixés au sol sur des pieux d'une capacité en arrachement et en compression de 35 kN.



*Figure 12 - Support pour tente  
(Gracieuseté de Biome Canada)*

#### 2.1.5. Œuvres d'art

L'aluminium est fréquemment utilisé dans la réalisation d'œuvres d'art extérieures en raison de son apparence, sa durabilité (résistance à la corrosion) et son excellente résistance mécanique qui permettent de construire des structures extraordinaires.

Les figures 13 et 14 illustrent la réalisation de l'œuvre CODEX POPULI de l'artiste Ludovic Boney à proximité de l'hôtel de ville de Québec.

En résumé, l'œuvre consiste en un mât incliné de 12 degrés et d'une hauteur de 23 mètres. Ce mât supporte 9 520 crochets suspendus pesant au total 800 kg et symbolisant les différents traités

nécessaires à l'accord de Québec à la base de la fondation du Canada. Les crochets sont fabriqués avec l'alliage d'aluminium 5052-H32 de 6mm d'épaisseur en raison d'une meilleure apparence lors du vieillissement.

Dans ce cas, une vitesse de vent de 140 km/h a été utilisée pour la conception puisque cet endroit est situé dans un corridor de vent. Également, étant donné que la forme des crochets favorise l'accumulation de verglas, une épaisseur de glace de 50mm fut utilisée.

Le moment d'encastrement ainsi présent est de 690 kN-m. Le mât principal est donc relié à un cadre sous terre (non visible) et les efforts sont transférés au roc par des ancrages en friction.



*Figure 13 - Mât incliné de la sculpture de l'oeuvre Codex Populi  
(Gracieuseté de L. Larouche)*



Figure 14 - Mât incliné de la sculpture comportant 25 colliers soutenant 9 520 crochets suspendus  
(Gracieuseté de L. Larouche)

La section du mât est constituée de plaques 6061-T6 de 19 mm d'épaisseur soudé (MIG) longitudinalement afin de former une section (Figure 15). Le fabricant a débuté par la soudure de deux plaques longitudinalement et a ainsi construit la façade de la section puis, un raidisseur intérieur a été ajouté. On a refait la même opération pour le côté opposé pour finalement souder

les deux pièces ensemble et ainsi former la section complète de 610 mm de profondeur par 381 mm de largeur.

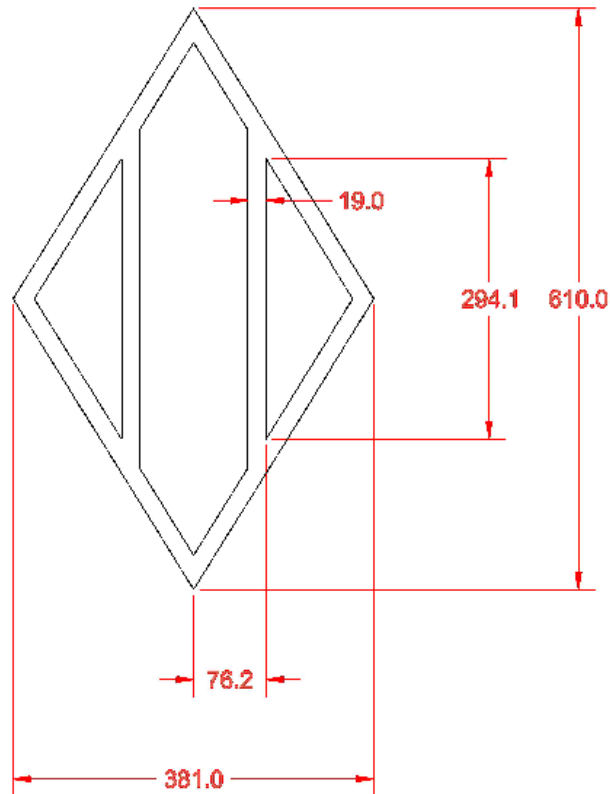


Figure 15 - Section type du mât construit avec des plaques de 19mm d'épaisseur soudées longitudinalement

### 3. Utilisation des équations du Code national du bâtiment (CNB) 2015 et de la norme intitulée Calcul de la résistance mécanique des éléments en aluminium CAN/CSA S157-17

Le cheminement d'un projet de construction de charpente en aluminium est identique à celui de tout projet de structure. Dans un premier temps, il s'agit de déterminer les forces externes s'appliquant sur le montage. Pour ce faire, on utilise la partie 4 du Code National du Bâtiment 2015 (CNB) et son commentaire pour calculer les forces pertinentes qui s'exercent sur la charpente. Les pressions exercées par le vent, l'effort latéral issu d'un séisme possible et le poids des éléments à supporter font généralement partis des aspects à étudier. Il s'agit d'utiliser les équations, tables et figures pertinentes à la situation dans le CNB.

Le choix des profilés d'aluminium requis doit simplement garantir que la résistance des pièces d'aluminium utilisées excède les efforts produits par ces forces externes :



$$\phi R_r \geq \sum \alpha_i S_i$$

$$M_r \geq M_f \quad (\text{équation 1})$$

$$V_r \geq V_f$$

où

$R_r$  : résistance de l'élément considéré;

$R_f$  : effort appliqué sur l'élément considéré résultant de la combinaison des forces pondérées appliquées sur la structure (vent, neige, etc.);

$M_r$  : moment résistant;

$M_f$  : moment appliqué dû aux charges pondérées;

$V_r$  : résistance en cisaillement;

$V_f$  : force de cisaillement appliquée dû aux charges pondérées;

$S_i$  : charges sollicitant la structure étudiée (charge vive, charge de vent, etc.);

$\alpha_i$  : facteurs de pondération des charges (charge vive, charge de vent, etc.);

$\phi$  : coefficients de tenue en service.

Le CNB contient toutes les informations pertinentes pour déterminer les efforts majorés qui correspondent à la partie droite de l'équation. La norme CAN/CSA S157-17 Calcul de la résistance mécanique des éléments en aluminium, permet de déterminer la résistance pondérée des éléments en aluminium de la structure, correspondant à la partie gauche des équations ci-dessus.

Les coefficients de tenue en service varient selon la nature du matériel utilisé et l'extrait ci-dessous de l'article 6.4 de la norme CAN/CSA S157-17 en précise les valeurs :

$\phi_y = 0,9$  lorsque la résistance se base sur la limite élastique;

$\phi_u = 0,75$  pour la résistance à la rupture et les soudures sur préparation;

$\phi_f = 0,67$  organes d'assemblage et les soudures d'angle.

La partie de gauche « Résistance R » dans l'équation 1 est déterminée avec la norme CAN/CSA S157-17 qui indique les propriétés physiques selon la nuance d'aluminium et, par la suite, leur résistance selon le type d'efforts présents.

Généralement, l'alliage d'aluminium 6061-T6 est utilisé pour des usages structuraux. Cependant le Tableau 1<sup>4</sup> à l'article 5.1.2 de la norme CAN/CSA S157-17 présente les propriétés physiques

<sup>4</sup> Noton qu'il y a une erreur dans ce tableau; on devrait lire à la 4ième colonne à la place de « surface », « plus grand que » et à la place de « profondeur », « plus petit que ».

pour d'autres types d'alliage; ces propriétés varient également en fonction de paramètres géométriques. L'alliage utilisé ici, appartient à la catégorie des profilés conformes à la norme ASTM B221; dans le cas d'extrusions pour toutes les épaisseurs possibles les propriétés mécaniques sont les suivantes :

$F_u = 260 \text{ MPa}$       résistance ultime du métal de base

$F_y = 240 \text{ MPa}$       limite d'élasticité du métal de base

$F_{wy} = 105 \text{ MPa}$       limite d'élasticité dans la zone thermiquement affectée de la soudure

## 4. Élaboration d'une structure à partir de ponts d'éclairage et de tubes en aluminium

### 4.1. Structure de support d'un écran

La figure 16 illustre un montage réalisé pour supporter un écran de projection. Le présent texte va mettre en évidence les articles pertinents de la norme CAN/CSA S157-17 permettant de déterminer la résistance des éléments en aluminium.

Un cadre de 6 mètres de hauteur et de 4 mètres de largeur a été fabriqué avec des ponts triangulés carrés de 400mm x 400mm construits avec des tubes 50mm de diamètre. Un écran de 4m x 4m est fixé au cadre d'aluminium et produit une résistance aux pressions horizontales du vent résultant en un moment de renversement. Afin de maintenir l'équilibre au renversement, des blocs de béton ont été installés et des béquilles (8 tubes à angle, soit quatre de chaque côté) relient les montants du cadre aux blocs de béton (voir figure 16). Ces béquilles sont fabriquées avec des profilés tubulaires de 60mm de diamètre et 2mm d'épaisseur en aluminium 6061-T6 à cause de leur disponibilité sur le site. Les fixations sont réalisées avec des collets mécaniques (Cheeseborough). Cet écran, installé de manière temporaire dans le quartier des spectacles de Montréal, pèse 1400 kg.

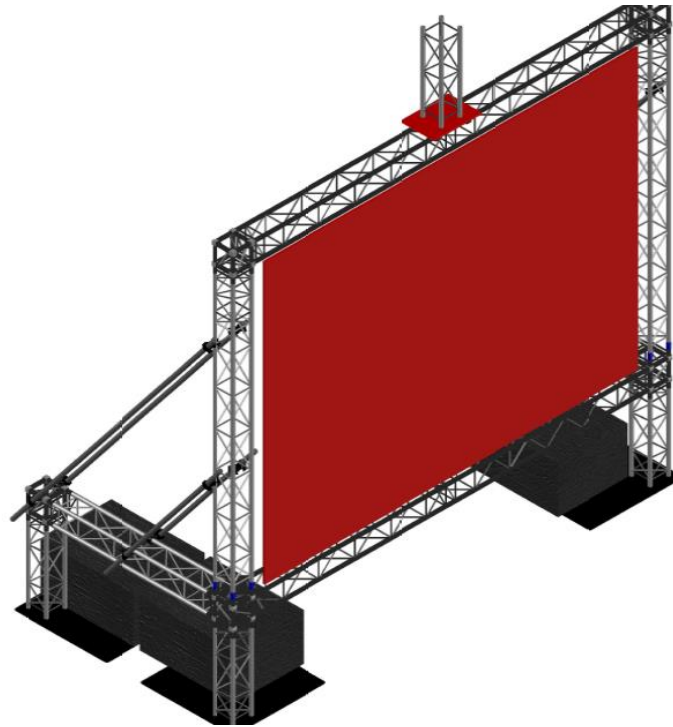


Figure 16 - Support d'écran à projection. L'écran a 4 m x 4 m et le support a 6 mètres de hauteur  
(Gracieuseté de L. Larouche)

Cet exemple permet d'examiner les différentes étapes de cette conception.

Tout d'abord, nous allons calculer les pressions exercées par le vent s'appliquant sur l'écran. Puis l'analyse du cheminement des efforts nous permet de constater que les tubes à angle servant de béquille sont soumis à des efforts de compression ou de tension selon la direction du vent. L'exemple 1 met en évidence les éléments de la norme CAN/CSA S157-17 permettant de calculer la résistance en compression d'une membrure en aluminium. Le second exemple illustre les articles de la norme déterminant la résistance en traction.

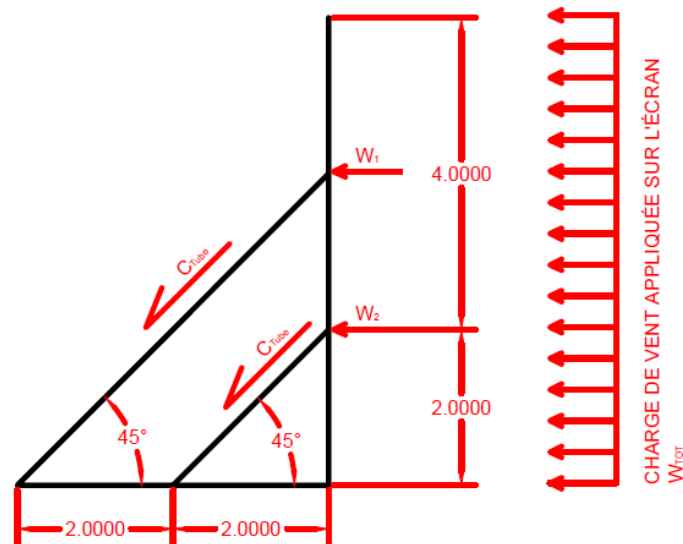
#### 4.2. Calcul des forces exercées par le vent

La figure 12 du commentaire I de la partie 4 du CNBC 2015 permet de calculer la pression totale exercée par le vent sur un panneau d'affichage autoporteur. Dans la situation présente, une charge pondérée de 30 kN s'exerçant perpendiculairement à la surface est obtenue et nous utiliserons cette valeur pour l'exemple numérique qui suit.

#### 4.3. Exemples de calculs

Exemple 1 - Vérification de la résistance en compression des tubes en aluminium 6061-T6

## Diagramme de corps libre



Exemple 1 - Cas en compression des tubes

Figure 17 - Diagramme de corps libre (tubes en compression)

**Profilé** (Ce profilé est utilisé pour des raisons de disponibilité immédiate)

Système impérial	Système métrique	Définition
$D_{Tube\ ext.} = 2.5\ in$	$D_{Tube\ ext.} = 63.5\ mm$	Diamètre
$Ep_{Tube} = 0.12\ in$	$Ep_{Tube} = 3.048\ mm$	Épaisseur

## Charge

Une solution approximative est présentée en utilisant un écran de 6m x 6m et une répartition de surface tributaire sur le tube supérieur :

- Aire totale : 6m x 6m = 36 m<sup>2</sup>
- Aire tributaire du tube supérieur
  - Hauteur : 3 m
  - Largeur : 3 m
  - Aire totale = 9 m<sup>2</sup>

$W = 30\ kN$  où  $W$  : Force totale exercée par le vent

$$C_{Tube} = \frac{9W}{36} \cdot \frac{1}{\cos(45^\circ)} = 10.6\ kN$$

9/36 : la valeur de 9/36 correspond au ratio entre l'aire tributaire du tube supérieur sur la surface totale de l'écran.

45° : angle entre le tube et le plan horizontal. Détermine la force de vent dans l'axe du tubulaire.

### Longueur

L1 = 4 m longueur horizontale

L2 = 4m longueur verticale

Considérons le tube le plus long

$$L_{Tube} = \sqrt{4^2 + 4^2} = 5.66 \text{ m}$$

### Propriétés mécaniques du profilé

Aluminium 6061-T6

$$E = 70\,000 \text{ MPa}$$

$$F_y = 240 \text{ MPa}$$

$$F_u = 240 \text{ MPa}$$

$$F_{wy} = 240 \text{ MPa}$$

Propriétés mécaniques selon le tableau 1 de l'article 5.1.2 de la norme CAN/CSA S157-17.

### Information sur le modèle

Appuis et tous les assemblages sont rotulés ;

Fixation avec U-bolt ;

k = 1 → Tableau 4 – Coefficients de longueur efficace, K  
article 10.2.1 de la norme CAN/CSA S157-17

### Solution

Calcul d'un rayon de giration pour un tube évidé :

$$r = \frac{\sqrt{(63.5)^2 + (57.5)^2}}{4} = 21.4 \text{ mm}$$

$$A_g = 579 \text{ mm}^2$$

$$\lambda = \frac{L_{Tube}}{r} = \frac{5.66}{21.4} = 264.5$$

$$\frac{K \cdot L}{r} > 200 \rightarrow$$

\*Les recommandations concernant l'élancement limite des éléments figurent maintenant à l'annexe H puisqu'elles ne constituent plus une partie obligatoire de cette norme. (CAN/CSA S157-17, clause 17.2)

Calcul de l'élanement normalisé de la paroi selon l'article 7.7.1 (tubes en compression axiale).

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{R}{t} \left( 1 + 0,03 \sqrt{\frac{R}{t}} \right)}$$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{31,75}{3,05} \left( 1 + 0,03 \sqrt{\frac{31,75}{3,05}} \right)}$$

$$\lambda = 14,2$$

\* Pour le rayon du tube R, le rayon externe a été choisi, car il est plus pénalisant.

Article 10.1.2

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{F_0}{E}}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{14,2}{\pi} \sqrt{\frac{240}{70\,000}}$$

$$\bar{\lambda} = 0,26$$

\* Dans le cas du flambement local,  $F_0 = F_y$

Calcul de la contrainte de flambage normalisé  $\bar{F}$  - article 10.1.3.

$$\bar{F} = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad \text{où} \quad \beta = \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}$$

$\alpha = 0,2$  car nous avons un traitement thermique T6.  
 $\bar{\lambda}_0 = 0,5$  car on évalue le flambement local (les parties).

Dans le cas présent, puisque  $\bar{\lambda} < \bar{\lambda}_0$ , il n'y a pas de flambement local alors  $\bar{F} = 1$ .  
(voir figure C17 disponible dans la section commentaire C10.1 de la norme CAN/CSA S157-17)

Afin de déterminer la capacité axiale du tube il faut calculer la contrainte de flambage globale normalisée ( $\bar{F}$ ). En se référant à la clause 10.2.1 nous pouvons évaluer la valeur d'élanement du tube en compression. La valeur de  $\lambda$  a été calculée précédemment et vaut 264,5. Donc la valeur de l'élanement normalisée  $\bar{\lambda}$  se calcule à l'aide de la clause 10.1.2.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{F_0}{E}}$$

La valeur de  $F_0$  se calcule selon le cas à l'aide de la clause 10.1.1. Dans notre cas, comme il n'y a pas de flambement local ni soudure,  $F_0 = F_y = 240 \text{ MPa}$ .

$$\bar{\lambda} = \frac{264,5}{\pi} \sqrt{\frac{240}{70\,000}}$$

$$\bar{\lambda} = 4,93$$

Il faut maintenant calculer la valeur de  $\bar{F}$  et pour se faire nous devons déterminer la valeur de  $\beta$  par l'équation suivante (article 10.1.3):

$$\beta = \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}$$

$\alpha = 0.2$  car nous avons un traitement thermique T6.

$\bar{\lambda}_0 = 0.3$  car on évalue le flambement global (les éléments).

$$\beta = \frac{1 + 0,2(4,93 - 0,3) + 4,93^2}{2(4,93)^2}$$

$$\beta = 0,54$$

Alors,

$$\bar{F} = \beta - \sqrt{\beta^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}}$$

$$\bar{F} = 0,54 - \sqrt{0,54^2 - \frac{1}{4,93^2}}$$

$$\bar{F} = 0,0396$$

Selon l'article 10.1.1

$$C_r = \phi_y A_g \bar{F} F_0$$

$$C_r = 0,9 (579)(0,0396)(240)$$

$$C_r = 4952 \text{ N}$$

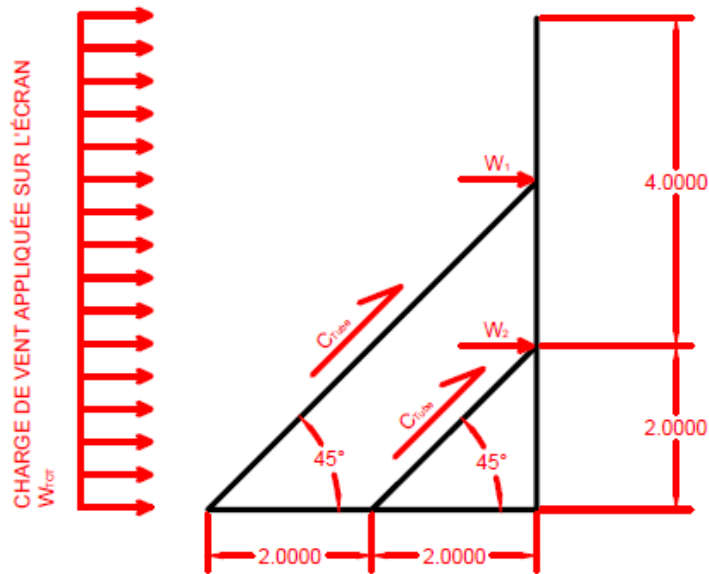
$$C_r = 4.95 \text{ kN} < C_{T\text{ube}} = 10.6 \text{ kN}$$

Étant donné que la résistance  $C_r$  est plus faible que la charge appliquée  $C_{Tube}$ , il faut utiliser un tube de diamètre plus important ou réduire l'élancement pour que la structure soit sécuritaire.

Advenant le cas où le vent souffle de l'arrière vers l'avant, les profilés tubulaires devront reprendre le même effort, mais en traction.

## Exemple 2 – Vérification de la résistance en traction des tubes en aluminium 6061-T6

### Diagramme des corps libres



Exemple 2 - Cas en tension des tubes

Figure 18 - Diagramme des corps libres (tubes en traction)

Selon l'article 9.2.2 de la norme CAN/CSA S157-17

$$T_r = \phi_y A_g F_y$$

$$T_r = (0.9)(579)(240)$$



$$T_r = 125\,000\text{ N}$$

$$T_r = 125\text{ kN} > T_{tube} = 10.6\text{ kN}$$

Étant donné que la résistance  $T_r$  est supérieure à la charge appliquée  $T_{tube}$ , le tube utilisé résiste aux efforts en traction.