Document de support de la présentation :

**La norme CAN/CSA S6:19, chapitre 17 et application à un platelage en aluminium pour les ponts**

AluQuébec

Table des matières

[Diapositive 8 3](#_Toc132648647)

[Diapositive 9 3](#_Toc132648648)

[Diapositive 10 3](#_Toc132648649)

[Diapositive 11 3](#_Toc132648650)

[Diapositive 12 4](#_Toc132648651)

[Diapositive 13 4](#_Toc132648652)

[Diapositive 14 5](#_Toc132648653)

[Diapositive 15 5](#_Toc132648654)

[Diapositive 16 6](#_Toc132648655)

[Diapositive 17 6](#_Toc132648656)

[Diapositive 18 6](#_Toc132648657)

[Diapositive 19 7](#_Toc132648658)

[Diapositive 20 7](#_Toc132648659)

[Diapositive 21 7](#_Toc132648660)

[Diapositive 22 8](#_Toc132648661)

[Diapositive 23 8](#_Toc132648662)

[Diapositive 24 8](#_Toc132648663)

[Diapositive 25 8](#_Toc132648664)

[Diapositive 26 9](#_Toc132648665)

[Diapositive 27 9](#_Toc132648666)

[Diapositive 28 9](#_Toc132648667)

[Diapositive 29 10](#_Toc132648668)

[Diapositive 30 10](#_Toc132648669)

[Diapositive 31 10](#_Toc132648670)

[Diapositive 32 10](#_Toc132648671)

[Diapositive 33 11](#_Toc132648672)

[Diapositive 34 11](#_Toc132648673)

[Diapositive 35 11](#_Toc132648674)

[Diapositive 36 11](#_Toc132648675)

[Diapositive 37 11](#_Toc132648676)

[Diapositive 38 11](#_Toc132648677)

[Diapositive 39 11](#_Toc132648678)

[Diapositive 40 12](#_Toc132648679)

[Diapositive 41 12](#_Toc132648680)

[Diapositive 42 12](#_Toc132648681)

[Diapositive 43 12](#_Toc132648682)

[Diapositive 44 12](#_Toc132648683)

[Diapositive 45 12](#_Toc132648684)

[Diapositive 46 13](#_Toc132648685)

[Diapositive 47 13](#_Toc132648686)

[Diapositive 48 13](#_Toc132648687)

[Diapositive 49 13](#_Toc132648688)

[Diapositive 50 14](#_Toc132648689)

[Diapositive 51 14](#_Toc132648690)

[Diapositive 52 15](#_Toc132648691)

[Diapositive 53 15](#_Toc132648692)

[Diapositive 54 15](#_Toc132648693)

[Diapositive 55 16](#_Toc132648694)

[Diapositive 56 16](#_Toc132648695)

[Diapositive 57 16](#_Toc132648696)

[Diapositive 58 16](#_Toc132648697)

[Diapositive 59 16](#_Toc132648698)

[Diapositive 60 17](#_Toc132648699)

[Diapositive 61 17](#_Toc132648700)

[Diapositive 62 17](#_Toc132648701)

[Diapositive 63 17](#_Toc132648702)

[Diapositive 64 17](#_Toc132648703)

[Diapositive 65 18](#_Toc132648704)

[Diapositive 66 18](#_Toc132648705)

[Diapositive 67 18](#_Toc132648706)

[Diapositive 68 18](#_Toc132648707)

[Diapositive 69 19](#_Toc132648708)

[Diapositive 70 19](#_Toc132648709)

[Diapositive 71 19](#_Toc132648710)

[Diapositive 72 19](#_Toc132648711)

[Diapositive 73 19](#_Toc132648712)

[Diapositive 74 19](#_Toc132648713)

[Diapositive 75 20](#_Toc132648714)

[Diapositive 76 20](#_Toc132648715)

[Diapositive 77 20](#_Toc132648716)

[Diapositive 78 21](#_Toc132648717)

[Diapositive 79 21](#_Toc132648718)

[Diapositive 80 et 81 21](#_Toc132648719)

[Diapositive 82 22](#_Toc132648720)

[Diapositive 83 22](#_Toc132648721)

[Diapositive 84 22](#_Toc132648722)

[Diapositive 85 22](#_Toc132648723)

[Diapositive 86, 87 et 88 22](#_Toc132648724)

[Diapositive 89 23](#_Toc132648725)

[Diapositive 90 23](#_Toc132648726)

[Diapositive 91 24](#_Toc132648727)

[Diapositive 92 24](#_Toc132648728)

[Diapositive 93 et 94 24](#_Toc132648729)

[Diapositive 95 24](#_Toc132648730)

[Diapositive 96 24](#_Toc132648731)

[Diapositive 97 25](#_Toc132648732)

[Diapositive 98 25](#_Toc132648733)

[Diapositive 99 25](#_Toc132648734)

[Diapositive 100 25](#_Toc132648735)

[Diapositive 101 25](#_Toc132648736)

[Diapositive 102 25](#_Toc132648737)

[Diapositive 103 25](#_Toc132648738)

[Diapositive 104 25](#_Toc132648739)

[Diapositive 105 26](#_Toc132648740)

[Diapositive 106 26](#_Toc132648741)

[Diapositive 107 26](#_Toc132648742)

[Diapositive 108 26](#_Toc132648743)

[Diapositive 109 26](#_Toc132648744)

[Diapositive 110 26](#_Toc132648745)

[Diapositive 111 27](#_Toc132648746)

[Diapositive 112 27](#_Toc132648747)

[Diapositive 113 27](#_Toc132648748)

[Diapositive 114 27](#_Toc132648749)

[Diapositive 115 27](#_Toc132648750)

[Diapositive 116-117-118 27](#_Toc132648751)

[Diapositive 119-120 27](#_Toc132648752)

[Diapositive 121 27](#_Toc132648753)

[Diapositive 122 27](#_Toc132648754)

[Diapositive 123 28](#_Toc132648755)

[Diapositive 124 28](#_Toc132648756)

[Diapositive 125 28](#_Toc132648757)

[Diapositive 126 28](#_Toc132648758)

[Diapositive 127 28](#_Toc132648759)

[Diapositive 128 28](#_Toc132648760)

[Diapositive 129 28](#_Toc132648761)

[Diapositive 130 28](#_Toc132648762)

[Diapositive 131 28](#_Toc132648763)

[Diapositive 132 29](#_Toc132648764)

[Diapositive 133 29](#_Toc132648765)

# Diapositive 8

* Avec la permission de CSA, le présent document contient des extraits de la norme CAN/CSA S6 :19. Celle-ci peut être achetée en ligne sur le site du Groupe CSA.

# Diapositive 9

* L’aluminium est un matériau qui est jeune quant à son utilisation dans le domaine des ponts si on le compare au bois, à l’acier et au béton. On note que le premier pont routier en aluminium au monde a été ouvert en 1950 à Arvida (ville Saguenay).

# Diapositive 10

* Un des avantages de l’aluminium est sa légèreté. On voit ici une passerelle en aluminium qui a été installée sur des consoles en acier. La légèreté de l’Al a permis de limiter la dimension (et donc les coûts) des consoles en porte-à-faux. Une règle du pouce est que pour la même rigidité, une structure en Al est deux fois plus légère qu’une structure en acier.

# Diapositive 11

* Afin d’illustrer ce qui a été mentionné à la diapo précédente, examinons une section rectangulaire en flexion.
* Pour l’acier, nous avons g = 77 kM/m^3, un module de Young de 200 000 MPa et une limite élastique de 350 MPa.
* Pour l’alliage 6061-T6, on a g = 27 kN/m^3 soit g\_acier/2,85 ; un module de Young de 70 000 MPa, soit E\_acier/2,86 et une limite élastique de 240 MPa soit Fy\_acier / 1,46
* Pour une poutre sur appui simple, le premier rectangle donne les résultats pour une poutre en acier, soit le poids/mètre W, la flèche D, et la résistance en flexion qui correspond au module de section S multiplié par la limite élastique Fy.
* Le rectangle #2 donne les mêmes informations pour une poutre en aluminium de même hauteur et largeur, mais en fonction de valeur relative à l’acier. On a donc une poutre plus légère, mais ayant une flèche au centre 2,9 x plus élevée que celle en acier. Le moment résistant est également plus faible.
* Le rectangle #3 donne les résultats en se donnant comme critère que la flèche de la poutre en Al soit la même que celle en acier. Pour cela, il faut augmenter l’inertie de telle façon que l’on ait , ce qui donne une auteur de la poutre en Al de 1,419 x h\_acier (I = bh3/12);
* Ainsi le poids de la poutre en Al est 2 x inférieur à celui de celle en acier et la résistance est 1,4 x supérieure.
* Si on avait pris le moment plastique pour la résistance, nous aurions également une résistance 1,4 x supérieure.

# Diapositive 12

* Le faible point de fusion (p/r acier) permet le moulage de pièces selon divers procédés ;
* Une formabilité tant à froid qu’à chaud facilite la fabrication par des procédés de formage, d’extrusion, etc. ;
* Les pièces extrudées sont très utilisées en génie civil ;
* Il y a une très grande variété de produits disponibles tant en feuille, en plaque, qu’extrudés ;
* Un des avantages importants de l’Al est son excellente résistance à la corrosion atmosphérique;
* L’image présente une pièce moulée à la base d’un poteau en Al servant à la signalisation routière

# Diapositive 13

* L'aluminium s'oxyde **lentement au contact de l'air**. Cette réaction, contrairement au cas du fer, conduit à la formation d'**alumine** (AL2O3) sous forme d'une fine couche superficielle qui sert de tampon **imperméable** entre l'air et le métal. On peut dire que l’aluminium s’**auto-protège**;
* L’épaisseur de la couche d’alumine est très mince (nanomètre);
* Si une rayure est faite en surface cela enlève la couche d’alumine. l’Al exposé à l’aire s’oxydera à nouveau reformant ainsi une nouvelle couche protectrice;
* On peut dire que l’Al s’auto-répare contrairement à l’acier;
* S’il y a des graffitis en surface, ceux-ci sont sur la couche d’alumine;
* Un simple sablage enlève l’alumine (et les graffitis) et une nouvelle couche d’alumine se reformera en quelques heures protégeant à nouveau l’Al contre la corrosion sans nécessiter l’application d’une couche de peinture ou autre système anti-corrosion
* Les photos à droite représentent des tests au brouillard salin (5000 heures (208 jours) d’exposition) faits sur l’acier du pont de Québec protégé avec le système Galvatech (homologuée MTQ et MTO) ;
* Peu importe le système protecteur, aussitôt que la surface est égratignée, la corrosion débute et pour l’arrêter, cela nécessite une intervention humaine parfois coûteuse.

# Diapositive 14

* On verra plus loin que, si on soude des éléments en Al par un procédé MIG ou TIG, les propriétés mécaniques dans cette zone diminuent.
* Le soudage par friction malaxage (*Friction stir welding* ou FSW) est un procédé de soudage à « froid » qui permet d’obtenir de meilleures propriétés mécaniques dans cette zone de soudage.
* Pour le soudage d’un seul côté (dessins de gauche), l’outil est composé d’un pion et d’un épaulement. Ce dernier sert à frotter l’Al en surface de chaque côté des plaques à souder afin de générer de la chaleur et ainsi amollir l’Al. Le pion joue le même rôle dans la matière. L’outil permet également de mélanger l’Al pâteux de chaque côté pour générer la soudure. Une force axiale est nécessaire pour générer la friction (ordre de grandeur en kN). L’outil tourne à une certaine vitesse angulaire (entre 5000 et 1000 tours / minute) et avance aussi à une certaine vitesse entre 500 et 1000 mm / minute). Ce soudage FSW classique nécessite un support sous les lèvres à souder.
* Sur le dessin de gauche, nous avions deux épaulements ce qui fait que la zone des lèvres des composants en Al est chauffée par les deux côtés en même temps générant la chaleur de façon symétrique. La force normale est assez faible (en Newton). Aucun support vertical pour reprendre la force normale n’est nécessaire.

# Diapositive 15

* Cette vidéo montre le soudage des ailes de 2 poutres en H (alliage 6061-T6).
* Pour joindre les deux ailes de 8 mm d’épaisseur, les paramètres optimaux sont : nombre de tours / minute = 800 ; vitesse d’avance = 600 mm / minute; force verticale environ 500 N.

# Diapositive 16

* Plus il fait froid, plus les propriétés de l’Al augmentent;
* Contrairement à l’acier, l’Al ne perd pas de ténacité à basse température;
* On utile beaucoup l’Al dans les secteurs aéronautique et aérospatial où les T sont très basses d’autant plus que l’Al est léger;
* Notons que la structure cristalline de l’Al est du type cubique à faces centrées et que celle de l’acier est du type structure cristalline cubique à corps centré; c’est ce qui explique la différence de tenue mécanique.

# Diapositive 17

* Recyclage: pas de détérioration des propriétés lors de la refonte (contrairement au béton, au bois, plastique et fibres naturelles qui ne sont pratiquement pas recyclables sans perte de propriétés);
* Si nécessaire, l’Al a une grande conductivité tant électrique que thermique; les lignes de haute tension sont en Al et non en cuivre (trop cher et trop lourd);
* Esthétisme (polissage, brossage, de couleur, etc.);
* Pouvoir réflecteur : économie énergie (moins de climatisation).

# Diapositive 18

Il y a cependant quelques défis liés à ce matériau :

* Le coût plus élevé de l’alliage par rapport à l’acier ( acier < Al < inox);
* La tenue à des températures > 150oC; étant donné son pont de fusion de l’ordre de 600°C, les propriétés mécaniques diminuent rapidement avec l’augmentation de la T ;
* Plus faible résistance que les aciers 🡺 pas utilisable partout ;
* Attention aux vibrations : pour une même rigidité, une structure en Al est 2x plus légère qu’une structure en acier ayant la même topologie ;
* La fréquence de vibration étant proportionnelle à la racine carrée de la rigidité sur la masse, la fréquence de la structure en Al sera plus élevée que celle en acier;
* Ce n’est pas un désavantage, mais il faut garder cela en tête lors de la conception;
* La plupart du temps c’est favorable ;
* La soudure MIG ou TIG nécessite l’utilisation d’un gaz inerte, car Al très réactif à l’air (+ cher);
* Zone affectée thermiquement : réduit les contraintes ultime et élastique.

# Diapositive 19

* La production de l’aluminium primaire nécessite une forte quantité d’énergie
* L’énergie pour produire 1 kg d’Al secondaire (recyclé) = 5% de l’énergie pour produire l’Al primaire ;
* Émission de CO2e intense si l’électricité utilisée n’est pas de source renouvelable ;
* Attention à la corrosion galvanique qui dépend de l’électronégativité des métaux en contact ;
  + Lorsque l’on met deux métaux en contact pendant une électrolyse, un devient une anode qui se sacrifie (se corrode) et l’autre la cathode ;
  + L’anode sera le métal le plus électronégatif ;
  + L’Al est plus électronégatif que l’acier donc, au contact de celui-ci, il se corrodera ;
  + Il existe des solutions qui évitent ce phénomène comme, par exemple, de métalliser ou galvaniser l’acier avec du zinc qui est légèrement plus électronégatif que l’Al.

# Diapositive 20

* On présente par la suite quelques notions de base sur le procédé d’extrusion ; celles-ci sont souvent utilisées en génie civil et dans les ponts et passerelles,

# Diapositive 21

* L’Al peut être transformé de diverses façons ; l’extrusion est une opération fortement utilisée pour fabriquer des produits semi-finis ;
* La meilleure façon d’expliquer le procédé d’extrusion est de revenir en enfance : on a un matériau malléable, la plasticine, une forme, une étoile et une chambre où l’on exerce une pression pour créer la forme;
* On part d’une billette d’un diamètre donné et d’une certaine longueur;
* On chauffe la billette de 350 à 500°C selon le type d’alliage;
* On installe la billette dans un conteneur creux au bout duquel, il y a un moule ou une matrice qui donnera la forme voulue au composant en Al;
* Celui-ci est par la suite redressé et il subit un traitement thermique approprié;
* On voit un exemple de moule simple qui permet le passage d’un cylindre à une plaque plus large que le diamètre de la billette;
* Le moule en acier peut être fabriqué en plusieurs parties;
* En bas à droite on peut voir des formes complexes de moules; fabriquer des moules est une science, mais relève également de l’art;
* Donc une capacité d’extrusion consiste à une force de poussée, un diamètre de billette et sa masse linéaire et l’utilisation ou non d’un élargisseur.

# Diapositive 22

* On voit sur cette photo, des exemples de formes complexes extrudées ;
* La forme dépend de son utilité i.e. sa conception pour l’usage prévu et son « extrudabilité » ; l’extrudeur gère ce dernier aspect;
* L’ingénieur civil a besoin des propriétés géométriques telles que les inerties, la constante de torsion la valeur du coefficient de cisaillement, etc. ce qui est complexe à calculer à la main pour des sections de formes complexes.

# Diapositive 23

* Un logiciel tel que ShapeDesigner permet de calculer ces quantités assez simplement : à partir d’un fichier DXF d’autocad importé dans ce logiciel, ce dernier calcul toutes les propriétés géométriques nécessaires à l’ingénieur.

# Diapositive 24

* On voit ici un exemple de passerelle en aluminium de 4 mètres de large et 27 mètres de long.
* Le temps de fermeture de la piste cyclable a été de 21 jours ouvrables, ce qui a permis de faire :
  + Démolition de l’ancienne passerelle en acier;
  + Installation des fondations préfabriquées;
  + Installation de la passerelle en aluminium préfabriquée;
* Comme le poids de la passerelle est environ la ½ d’une passerelle en acier, cela à permis d’utiliser des fondations sur semelles et culées préfabriquées

# Diapositive 25

* Les objectifs de cette formation sont :
  + Tour d’horizon du chapitre 17 de la norme CAN/CSA S6:19
  + Application au platelage du pont de St-Ambroise.

# Diapositive 26

* Le chapitre 17 de la norme S6 :19 sert à calculer la résistance mécanique, sur la base des états limites ultimes de différents composants de la structure :
  + Moment résistant : Mr
  + Charge axiale maximale en compression ou en tension : Cr ou Tr
  + Etc.
* Cette valeur doit être plus grande que les sollicitations appliquées selon le cas de charge le plus critique avec la bonne pondération de celle-ci (chapitre 3, CSA S6 :19)

# Diapositive 27

* La résistance des composants en aluminium dépend de divers facteurs
  + Résistance en zone élastique ou plastique ?
  + Résistance liée à la stabilité globale :
    - Flambage (effet P-d);
    - Déversement;
  + Résistance liée à la stabilité locale :
    - Voilement local;
  + Résistance liée à la stabilité globale de la structure :
    - effet P-D;
  + Résistance des assemblages soudés ou boulonnés.

# Diapositive 28

* Rappel sur le principe du calcul eux états limites
* États limites d’utilisation:
  + Comportement de la structure en service: déformations, vibrations;
  + Ne compromettent pas la sécurité de la structure;
  + Incommodant pour les usagers (vibration, flèches excessives);
* États limites ultimes : mettent en cause la sécurité:
  + État limite de résistance;
  + État limite de fatigue;
  + État limite lié à la stabilité de la structure;
  + Etc.

# Diapositive 29

LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES

# Diapositive 30

* Quelques mots sur la méthode simplifiée ;
* Elle permet d’analyser une seule poutre en appliquant sur celle-ci, une fraction de la charge du camion de conception qui normalement s’applique sur l’entièreté de la structure ; pour un pont sans biais (l’axe lié à la largeur du pont est perpendiculaire à l’axe de la route) :
  + est le  moment longitudinal produit par une voie de surcharge CL-W;
  + est la fraction de charge calculée par une méthode simplifiée;

# Diapositive 31

* Pour les ponts à poutre avec un platelage en aluminium (§5.6.4.3), FT est donné par cette équation où
  + m est le coefficient de modification de la largeur de voie,
  + l est un paramètre de largeur de voie,
  + gc est un coefficient de modification de charge de camion pour les ponts à dalle sur poutre,
  + DT est la largeur de répartition de la charge du camion (mètre)
  + Le §5.6.4.3 pour les platelages en Al à l’état ultime en flexion donne
    - DT = 2,55
    - l = 0
  + Or pour les dalles en béton ces paramètres varient en fonction de Le la longueur de la travée équivalente

# Diapositive 32

* Une étude réalisée pour le compte du MTQ a permis de définir plus finement ces valeurs ;
* celles-ci seront intégrées dans la version 2025 ;
* Le tableau actuel se base sur la rigidité de « madriers » en bois placés transversalement aux poutres ; celui-ci étant moins rigide (EI) alors la distribution entre les poutres est beaucoup moins efficace ;
* Cette approche est très prudente

# Diapositive 33

* Afin d’avoir une idée de la différence entre les deux calculs (version 2019 vs version 2025), on voit, ici, les caractéristiques géométriques du pont de St-Ambroise
* On obtient FT = 0,58 vs 0,41.

# Diapositive 34

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 35

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 36

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 37

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 38

* L’alliage le plus courant dans le domaine des ponts provient de la série 6xxx qui est un alliage extrudable et traitable thermiquement ;
* L’alliage de la série 5xxx s’utilise sous forme de plaque laminée (non extrudable) et peut servir à la fabrication de poutres assemblées (soudage de plaques).

# Diapositive 39

* Le tableau 17.1 donne les valeurs à connaître pour la conception avec une distinction entre les zones affectées thermiquement (ZAT) par le soudage et celle du matériau vierge ;
* On remarque la résistance en cisaillement contient un facteur 0,6 qui multiplie Fu et Fy. Cette valeur provient du critère de von Mises arrondi (
* OPTION : où sont les contraintes principales. En cisaillement pur dans une direction

# Diapositive 40

* Cette dispositive présente un extrait du tableau 17.2 de la norme S6 :19; ce tableau fournit les valeurs de résistance à utiliser pour le calcul de la résistance des composants en aluminium. Nous y trouvons la valeur de la résistance ultime autant sur le matériau vierge que dans la ZAT. Il en est de même pour la limite élastique.
* Pour l’alliage 6005A-T61, ces valeurs sont valables pour des épaisseurs de 0 à 25 mm. Pour des pièces extrudées de l’alliage 6061 ces valeurs sont valables, quelle que soit l’épaisseur de la paroi.

# Diapositive 41

* Pour les alliages de fonderie où la qualité doit être contrôlée, le tableau 17.3 donne, en fonction de la taille du lot, le nombre de pièces à radiographier et le de pièces qui doivent être conforme.

# Diapositive 42

* Le tableau 17.4 donne les propriétés mécaniques du métal d’apport servant au soudage. Il est important de se rappeler que dans la ZAT, on doit choisir la valeur la plus petite de Fu et de Fy entre le métal d’apport et le matériau de base.

# Diapositive 43

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 44

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.
* Il faut éviter de développer une action mixte entre le béton et l’aluminium même si la norme le permet, car le coefficient de dilation de l’Al est 2 x plus élevé que celui du béton et de l’acier.

# Diapositive 45

* Cet exemple en illustre la raison.
* À droite, nous avons une poutre en acier solidaire du platelage en aluminium, i.e. qu’une action mixte peut se produire (un seul axe neutre).
* À gauche, à la figure c, on présente la déformée de la structure sous les charges d’origine thermique en été. Dans cette période, l’aluminium se dilate plus que l’acier. Ces matériaux étant connectés, la structure se déforme vers le haut mettant en compression l’aluminium puisque ce dernier s’allonge plus que l’acier. On voit sur le graphique de gauche la distribution du changement de température sur la hauteur du tablier par la méthode prescrite par la norme S6. Le gradient de température sur l’épaisseur du platelage en aluminium est faible puisque ce matériau conduit bien l’énergie thermique (la chaleur).
* Sous les charges de véhicule, on remarque que le tablier redevient pratiquement plat.
* En hiver, nous avons l’effet inverse ; l’Al se contractant plus que l’acier le platelage tend à se raccourcir ce qui le met en tension.
* Que ce soit en été ou en hiver, ce différentiel de dilatation / contraction amène des efforts de cisaillement aux extrémités du pont très importants à l’interface Al/ acier ce qui entraine une conception plus lourde du platelage de l’Al. Il n’y a donc pas d’avantage financier à développer une action mixte Al / acier. De plus, à ces efforts de cisaillement, il faut ajouter ceux induits par le chargement mécanique.
* Cependant si la poutre était faite en Al, alors une action mixte pourrait être mobilisée, car il n’y aurait plus de différentiel de dilatation / contraction entre le platelage et les poutres.

# Diapositive 46

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 47

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 48

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 49

* Le calcul de l’aire nette effective d’un composant en aluminium se fait de la même façon que pour les composants en acier.
* Pour les segments perpendiculaires à la force, on a ;
* Pour tout segment parallèle à la force, on a un facteur 0,6 qui s’applique par cette partie est en cisaillement et que la résistance est plus faible (0,6 du tableau 17.1);
* Pour des assemblages en quiconque, l’aire nette est définie par pour tout segment incliné par rapport à la force. Le terme vient des travaux de *V. H. Cochrane, “Rules for Rivet Hole Deduction in Tension Members,” Engineering News-Record, Vol. 80, November 16, 1922.*

# Diapositive 50

* Cet exemple illustre le calcul de l’aire nette en fonction des chemins de rupture possible au nombre de 5 ;
* Le chemin 1 correspond à une rupture de la plaque d’épaisseur t2 selon la ligne rouge : c’est la largeur de la plaque moins le diamètre des 2 boulons X l’épaisseur t2 ;
* Le chemin bleu avec la plaque d’épaisseur t1 ; c’est la largeur de la plaque moins le diamètre d’un boulon X l’épaisseur t1 ;
* Le chemin noir : la largeur de la plaque + deux largeurs des parties inclinées moins 3 diamètres des trous de boulons ;
* Le chemin jaune « la largeur de la plaque + une largeur des parties inclinées moins 2 diamètres des trous de boulons ;
* Le chemin rouge correspond à la déchirure de la plaque d’épaisseur t1 : largeur de la partie parallèle à la force (2 X e) + (la largeur des parties inclinées) X 2 moins 2 diamètres des trous de boulons.

# Diapositive 51

* Les diapos qui suivent vont permettre deux phénomènes importants dans le calcul de la résistance de composant en aluminium :
  + Le voilement ou flambement local ;
  + Effet du soudage dans la zone affectée thermique ZAT ;
* On note que les sections d’acier du *Hanbook of Steel Construction* ne sont pas susceptibles de flamber localement et les propriétés mécaniques de l’acier ne sont pas affectées par le soudage contrairement à l’Al ;
* Pour les sections extrudées en Al, il est possible de concevoir la section que l’on veut, il se pourrait que des parois voilent avant d’atteindre la résistance maximale de la section en flexion, en torsion, etc.
* Les prochaines diapositives permettront de transformer certaines épaisseurs de parois afin de travailler par la suite avec Fy et Fu ou des modules de sections modifiées Sm.

# Diapositive 52

* On rappelle ici ce qu’est le module de section élastique et celui plastique ;
* La distribution des déformations est linéaire sur la hauteur de la section. En régime élastique, la distribution des déformations est également linéaire sur la hauteur de la section ;
* Le moment My amène la contrainte à la fibre extrême à la valeur de Fy;
* Le module de section S, qui est une propriété purement géométrique, permet de calculer My;
* Par la suite, si le moment appliqué dépasse My, alors on considère qu’il n’y a pas d’écrouissage et la contrainte Fy progresse vers l’axe neutre plastique ;
* On atteint théoriquement le moment plastique Mp, qui correspond à la plastification complète de la section ; My, se calcule alors avec le module de section plastique Z qui est également une propriété purement géométrique de la section ;
* Naturellement, tout ceci change s’il y a la présence de soudure sur la section ou s’il peut y avoir un voilement d’une des parois de la section.

# Diapositive 53

* L’aire transversale effective des sections soudées longitudinalement, , doit être déterminée d’après l’épaisseur effective ;
* Si certaines parties seulement de la section transversale sont affectés par le soudage, par exemple dans le cas de soudures longitudinales, l’épaisseur effective , du métal de la zone affectée par la chaleur doit être calculée par cette équation pour des sections plastiques ;
* Par la suite, on calcule de nouvelles propriétés géométriques avec cette valeur de tm;
* La longueur sur laquelle s’applique cette épaisseur modifiée sera présentée un peu plus loin ;

# Diapositive 54

* Pour des sections élastiques, l’épaisseur effective , du métal de la zone affectée par la chaleur doit être calculée par cette équation.

# Diapositive 55

* Ce dessin illustre un exemple de calcul de propriétés de sections affectées thermiquement en utilisant tm ;
* Si des soudures sont présentes sur l’aile supérieure, on modifie l’épaisseur de la ZAT selon une des 2 équations présentées, on calcule un nouveau C.G et l’inertie de cette section modifiée par rapport au C.G. ainsi qu'un nouveau module de section élastique.

# Diapositive 56

* Cette diapo provient du livre de Beaulieu; on voit ici Amy qui est l’aire de la section modifiée avec tm pour une section élastique ( et Amu qui est l’aire de la section modifiée avec pour une section plastique.

# Diapositive 57

* Ce tableau de la norme S6 :19 présente la façon d’estimer la longueur de la ZAT en fonction de différents cas de figure de patrons de soudage. La largeur de la ZAT, bhaz, est fonction de l’épaisseur de la plaque soudée la plus épaisse. (HAZ : *Heat Affected Zone*).

# Diapositive 58

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 59

* On présente ici, la manière de tenir compte du voilement (flambement local) sur le comportement global du composant analysé ;
* On note ici que est la contrainte de flambement normalisée pour les parois de la membrure. (on verra plus tard que c’est aussi la contrainte normalisée pour des membrures);
* La valeur va de 0 (aucune résistance) à 1 où la pleine résistance est atteinte, i.e. que l’on peut atteindre Fy;
* Pour une paroi soutenue / retenue sur 2 rives, la valeur modifiée tm s’écrit .
* Cette équation permet de prendre en compte le comportement post-voilement d’une ou des parois d’un composant sollicité par des efforts.

# Diapositive 60

* Les sections des cornières et des éléments extérieurs supportés le long d’une seule rive ne doivent pas être considérées offrir une résistance au post-flambement et le flambement local ou en torsion doit être supposé comme entrainant la ruine
* Après le flambement local de la paroi, c’est la ruine de la section.

# Diapositive 61

* Il est possible de calculer une résistance modifiée de la section lorsqu’il y a présence d’un soudage longitudinale
* La limite élastique Fy est modifiée en proportion de la surface soudée;
* On peut travailler par la suite avec la vraie section.

# Diapositive 62

* Il est possible également de calculer une résistance modifiée de la section lorsqu’il y a présence de flambement locale des sections qui possèdent une résistance post-voilement :
* Ceci ne s’applique pas aux sections de cornières et aux éléments extérieurs dont une seule rive longitudinale est supportée

# Diapositive 63

* On présente par la suite quelques notions de voilement de paroi qui sont retenues sur une rive ou sur 2 rives.

# Diapositive 64

* La solution de l’équation différentielle pour le flambage local d’une plaque est
* k dépend des conditions aux limites aux pourtours de la plaque sollicitée dans son plan ;
* on admet que « b » est la largeur de la paroi qui est sollicitée en compression et t son épaisseur ; le ratio b/t est appelé l’élancement de la paroi qui sera noté par la suite l.

# Diapositive 65

* On donne ici quelques valeurs de k selon la retenue des 2 côtés de la plaque ;
* k = 4 si les côtés orange et bleu sont rotulés ;
* k = 5,42 si un des côtés est rotulé et l’autre encastré ;
* etc.

# Diapositive 66

* On voit sur cette figure la résistance d’une telle paroi en fonction de l’élancement b/t ;
* Pour une paroi élancée (un ratio b/t élevé), il y aura un flambement élastique (flambement d’Euler) à un niveau de contrainte faible ;
* Au-delà d’une certaine valeur d’élancement, la résistance déviera de la solution de flambement d’Euler (zone de transition) ;
* Finalement pour une valeur en deçà d’une certaine valeur d’élancement, la résistance plastique pourra être atteinte.

# Diapositive 67

* La norme utilise par la suite une résistance normalisée entre 0 et 1, , en fonction d’un élancement normalisé

# Diapositive 68

* La valeur de résistance en voilement peut être réécrite en utilisant le paramètre où « m » dépend de plusieurs facteurs et sera défini par la suite ;
* La valeur de l’élancement de est par la suite normalisée en utilisant le ratio Fy sur la valeur du flambement d’Euler ce qui permet d’écrire ;
* La valeur de l’élancement normalisée dépend donc de l’alliage.

# Diapositive 69

* Il est important de mentionner à ce stade que la procédure du calcul de la résistance d’un composant en Al en compression, flexion, en cisaillement, etc. consiste à calculer en premier la résistance au flambement local normalisée à partir de et donc de l;
* Avec la valeur de , on pourra par la suite calculer la résistance globale.

# Diapositive 70

* Les diapos suivantes illustrent comment calculer l en fonction de différentes situations;
* On voit sur la figure 17.1 comment mesurer la valeur de « b ».

# Diapositive 71

* Pour le calcul de l on a, par exemple, les 3 situations suivantes.

# Diapositive 72

* Également le cas d’éléments courbés.

# Diapositive 73

* On voit, ici, les résultats de tests effectués à l’Université Laval ;
* Sur la photo de gauche, il y a voilement de parois retenues sur 2 rives d’un tube en compression ;
* Sur la photo de droite, on observe le voilement des parois d’une poutre en I.

# Diapositive 74

* Cette diapo illustre l’algorithme qui permet de calculer la résistance d’une colonne en I ou en C en compression en prenant en compte le voilement local ;
* Nous calculons en premier l’élancement l de la paroi la plus élancée;
* Cette valeur est normalisée pour obtenir ;
* Avec cette dernière valeur, on peut calculer la résistance normalisée au flambement due au flambement local avec cette équation ; plus de détails seront donnés un peu plus loin ;
* La valeur de la contrainte réelle maximale est calculée *F0 =*  ;
* La résistance en compression dépend de l’élancement de la colonne
* Cet élancement est normalisé où la valeur de *F0* est liée au voilement local ; autrement dit, si, la section est compacte, alors et *F0 =* ;
* La résistance normalisée au flambement global se calcule avec la même équation que pour le flambement local, mais avec la valeur en orange;
* Ainsi, à l’état limite ultime, la résistance en compression est estimée par où la valeur de est toujours la valeur de la contrainte de flambement locale d’une des parois du profilé en I ou en C ;
* Nous verrons un peu plus loin le détail de l’équation servant au calcul de la résistance normalisée.

# Diapositive 75

* On présente ici comment calculer l’élancement d’une paroi retenue sur deux rives ;
* Pour un élément fléchi dans propre plan, on a
  + ou
  + = contrainte de compression maximum MPa (négative)
  + = contrainte sur l’autre rive MPa (positive si en traction)

# Diapositive 76

* Les contraintes aux fibres extrêmes sont liées au module de section élastique  ; en tenant compte du signe (M est un moment positif), on obtient la valeur de « m » en fonction des modules de section élastique.

# Diapositive 77

* L’article 17.9.1.2 permet le calcul de m (et donc de l’élancement λ) pour une paroi retenue sur 2 rives d’un poteau en compression ou pour une partie en compression d’un composant en aluminium en flexion comme la paroi d’un type ou de la forme en chapeau en flexion.
* On rappelle que la longueur « a » est la longueur de la paroi qui retient la partie sollicitée en compression et « w » son épaisseur.
* Dans le dernier cas, la paroi de hauteur « a » et d'épaisseur « w » est en flexion; sa partie supérieure étant comprimée et sa partie inférieure tendue.
* si , i.e. si est « élancée » alors et on doit vérifier cette partie comme un élément fléchi dans son propre plan § 17.9.1.2.2

# Diapositive 78

* Cette figure illustre l’effet de la paroi sur la rigidité aux rives de l’élément en compression : plus les rives sont rigides plus la charge de flambement local augmente.
* Pour des parois très flexibles sur lesquelles s’appuie l’élément en compression, c’est comme si nous avions des rotules aux extrémités.
* Pour des parois plus rigides, les extrémités de l’élément en compression sont plus retenues ; on a une retenue élastique ; plus les parois sur lesquelles l’élément en compression s’appuie sont rigides, plus on se dirige vers un encastrement.
* Un raidisseur central permet également d’augmenter la résistance au voilement et donc de diminuer la valeur de l.

# Diapositive 79

* On voit donc sur cette figure que la plus grande valeur de m est de 1,65 ce qui correspond à des rotules.

# Diapositive 80 et 81

* Comme dernier exemple du calcul, on examine le cas d’élément comprimé à une rive supportée et l’autre rive comporte une lèvre.
* Cette lèvre rigidifie l’élément comprimé et diminue donc son élancement.
* Les quantités calculées ici font référence à des axes de référence.
* est le moment d’inertie polaire de la semelle et du raidisseur par rapport à la rive supportée, i.e. p/r à l’axe p-p.
* est la constante de torsion de St-Venant pour la semelle et le raidisseur.
* =est la constante de gauchissement, pour la semelle et le raidisseur par rapport à la rive supportée
* est le i.e par rapport à l’axe s-s
* Etc. (LE RESTE EST EXPLICITE).

# Diapositive 82

* Le § 17.10 présente les membrues en tension ; il n’y a pas de différence avec l’acier.

# Diapositive 83

* Le § 17.11 présente le calcul de la résistance de membrures en compression. L’approche est similaire à celle des sections en acier à la différence ici que le calcul de la résistance globale prendra en compte la résistance locale due au flambement de la paroi la plus élancée (la plus flexible) de la membrure en compression et/ou la présence de soudure sur la section.
* L’élancement normalisé est donné sur cette équation où λ est la valeur classique d’un élément comprimé. La valeur de Fo permet de prendre en compte le voilement et/ou la présence de soudure sur membrure comprimée.

# Diapositive 84

* Comme pour le voilement, la stabilité globale d’une membrure en compression se base sur l’équation de flambement d’Euler.
* Pour une membrure plus compacte, on passe d’un flambement élastique à un flambement avec plastification partielle puis à une plastification complète sans flambement.

# Diapositive 85

* Cette courbe de flambement local est normalisée en fonction de i.e que .

# Diapositive 86, 87 et 88

* Le calcul de se fait avec l’équation suivante que ce soit pour le flambement local ou global.
* Ce sont des courbes obtenues d’un ensemble de tests expérimentaux dont les résultats ont permis de créer une courbe du style *curve fitting.*
* Ce qui distingue la valeur de entre le flambement local et global est la valeur de 0.
* Pour une membrure (orange) 0 =0,3. Autrement dit si est plus petit que 0, il n’y aura pas de flambement global.
* Pour une paroi de la membrure (vert) 0 = 0,5. Autrement dit si est plus petit que 0, il n’y aura pas de flambement local.
* Un autre phénomène est pris en compte dans le calcul de au travers du paramètre « a » qui permet de prendre en compte le traitement thermique de la membrure (CONTINUER SUR LA DIAPO).
* On voit la différence sur cette figure en fonction du traitement thermique.
* La figure suivante représente les courbes de flambement local en fonction qu’il y ait ou non une résistance post-flambement et en fonction du traitement thermique

# Diapositive 89

* L'article § 17.11.3 présente comment calculer la résistance de membrures en compression axiale.
* Si plusieurs types de mise hors service est possible, on doit prendre la valeur la plus petite de ce qui correspond à la valeur de l’élancement global la plus élevée.

# Diapositive 90

* Cette diapositive résume les calculs à effectuer permettant la détermination de la valeur de
* Tout d’abord, il faut déterminer la valeur de *F0* qui permettra le calcul de l’élancement normalisé de la membrure au niveau global i.e. .
* La valeur la plus élevée est *F0 = Fy,* i.e. qu’il n’y a pas de flambement local de paroi composant la membrure, et il n’y a pas de soudure.
* *F0 =Fwy,* s’il y a présence d’une soudure transversale entre les extrémités de la membrure comprimée.
* *F0 =Fwy* et pour le flambement de paroi retenue sur une seule rive.
* *F0 = Fm,* pour le flambement de paroi retenue sur deux rives (ou plus).
* *F0 = Fm,* pour une soudure longitudinale sur la membrure.
* La valeur de à choisir est la plus petite;
* Par la suite, le calcul suivant est direct à partir de l’élancement; et l’élancement normalisé est . On calcule puis

# Diapositive 91

* La même procédure s’applique pour le calcul du moment résistant d’une poutre qui peut déverser, pour la résistance en cisaillement, etc.

# Diapositive 92

* Ces figures illustrent ce que l’on entend par résistance post-voilement d’une paroi retenue sur deux rives seulement.
* Même si les parois voilent, le surplus d’effort ajouté après le flambement local se concentre sur les coins de la section. Il y a donc une réserve de résistance qui est prise en compte.

# Diapositive 93 et 94

* Le § 17.12 donne les équations nécessaires aux calculs de membrures en flexion.
* Deux cas se présentent : calcul de pour une poutre sans possibilité de déversement et avec possibilité de déversement latéral. Dans les deux cas, tout comme pour une membrure en compression, on doit prendre en compte a priori, le flambement local des parois composant la membrure et la présence de soudure.
* Le calcul du moment résistant d’une poutre qui ne peut pas déverser se base sur la classe de la section.
  + Classe 1 : une section compacte pouvant se plastifier entièrement
  + Classe 2 : une section non compacte permettant d’atteindre Fy aux fibres extrêmes de la section;
  + Classe 23 : une section élancée dont la résistance est contrôlée par le flambement local
* Ce dernier survient dans les poutres de ponts assemblés en acier.

# Diapositive 95

* La classe 1 correspond à un élancement normalisé de paroi . Lorsque , on aura

# Diapositive 96

* La classe 2 correspond à un élancement normalisé de paroi . Lorsque , on aura
* La classe 3 correspond à un élancement normalisé de paroi . On rappelle que si , il n’y a aucun flambement local.
* La valeur de doit être calculée pour toutes les parois de la poutre et on ne retient que la plus grande valeur de celles-ci.

# Diapositive 97

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 98

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 99

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 100

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 101

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 102

* Nous allons appliquer ce que l’on a vu sur un exemple, soit le calcul de la résistance d’un platelage en aluminium sur 5 poutres d’acier correspondant au Pont P-17948 St-Ambroise construit en 2015.

# Diapositive 103

* Ce tableau donne quelques caractéristiques géométriques du pont.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 104

* Ce tableau donne les propriétés du platelage.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 105

* L’alliage utilisé est 6063-T6 dont les propriétés mécaniques sont données au tableau 7.2 de **CAN/CSA S6:19**

# Diapositive 106

* Ce tableau donne les propriétés des poutres en I galvanisées.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 107

* Ce tableau donne les charges mortes des autres composants.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 108

* Ce tableau donne les charges vives.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 109

* Si on prend la méthode simplifiée, le moment porté par une seule poutre s’écrit :
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 110

* Le concepteur a fait l’hypothèse que le platelage ne contribue pas à la résistance des charges.
* Le ratio des rigidités donne
* Pour estimer le moment induit dans le platelage, on admet que la courbure du platelage est la même que celle de la poutre qui résiste aux charges :
* Ce qui permet d’écrire que le moment sollicitant dans le platelage est

# Diapositive 111

* Pour la flexion longitudinale, on a une « aile supérieure » en compression
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 112

* On doit déterminer la classe de la section (il n’y a pas de problème de déversement ici)
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 113

* La partie en bleu est en compression et les parties en orange en compression dans le haut et tension dans le bas.
* On applique la clause §17.9.1.2.3
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 114

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 115

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 116-117-118

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 119-120

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 121

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 122

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 123

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 124

* On calcule le CG et l'inertie en n'utilisant que les peaux extrêmes (par mètre de largeur)
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 125

* On a donc en flexion transversale la partie inférieure en compression avec une soudure en plein centre.
* On considère que cette partie est comme une colonne en compression.
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 126

* On doit calculer l’élancement kL/r et la valeur de l’élancement normalisé. Ici on prend *F0 = Fwy  et*
* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 127

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 128

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 129

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 130

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 131

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 132

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.

# Diapositive 133

* LES INFORMATIONS SUR LA DIAPOSITIVE SONT EXPLICITES.