Document de support à la présentation :

**Introduction au matériau aluminium**

Contenu développé par :

**Mario Fafard**

AluQuébec

# Diapositive 4

* Voici quelques avantages liés à l’Al
* L’aluminium étant plus léger que l’acier et le béton, il peut, dans certain cas, nécessiter des fondations plus légères et parfois, dans certaines situations, comme dans le cas des passerelles, il permet s’éviter l’utilisation de pieux aux profits de semelles filantes;
* Sous les charges sismiques les efforts latéraux sont diminués de 2 à 5 fois;
* Lorsque l’on veut ajouter une passerelle à un pont existant, la légèreté de l’aluminium permet de minimiser le renforcement de la structure existante.

# Diapositive 5

* 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 6

* 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 nécessité l’application d’une couche de peinture ou autre système anti-corrosion.

# Diapositive 7

* Cet exemple illustre 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 couteuse.

# Diapositive 8

* Voici deux lampadaires installés à peu près au même moment : un en acier et un en aluminium;
* Les deux sont enterrés dans de la neige avec du sel en hiver;
* On remarque la grande résistance à la corrosion du lampadaire en Al.

# Diapositive 9

* 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;
* L’aluminium demeure résilient à basse T; l’acier devient fragile à basse T;
* 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 10

* Recyclage: pas de détérioration des propriétés lors de la refonte (contrairement au béton, au bois, plastique et fibres naturelles qui ne sont pratiquement pas recyclable 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 11

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 ;
* Vérifier les 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 la contrainte ultime et élastique.

# Diapositive 12

* 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 13

* On peut trouver dans un bâtiment des composants en Al un peu partout comme les portes, fenêtres, mur rideaux, panneaux solaires, etc. ;
* Notons qu’environ 25 à 30 % de l’Al produit se retrouve dans le secteur du bâtiment.

# Diapositive 14

* On peut donner du volume à l’Al pour donner une texture à celui-ci ;
* L’Al peut être brossé comme fini de surface ;
* On voit une toiture avec un bardeau en Al installé en 2003 ;
* La photo a été prise en 2020 et on remarque aucune dégradation de celle-ci ;
* On estime sa durée de vie à plus de 75 ans alors que pour le bardeau d’asphalte on parle de 15 à 20 ans.

# Diapositive 15

* Des composants en Al servent d’ossature pour les panneaux solaires : durable et léger.

# Diapositive 16

* L’Al est fortement utilisé dans les murs rideaux, puits de lumière et pour les lampadaires.

# Diapositive 17

* À gauche, on voit le pont de Gateshead qui se lève pour laisser passer les bateaux ; le platelage est en Al ;
* À droite, on voit un parement extérieur fait de 15 000 disques en Al.

# Diapositive 18

* À gauche, un autre exemple de parement extérieur texturé ;
* L’Al poli (fini miroir) recouvre un bâtiment appartenant à Amag (TopBrigh) en Autriche ;
* L’Al garde un niveau de réflectance de près de 100% pour une large gamme de longueur d’ondes.

# Diapositive 19

* Le premier pont en Al au Québec et même au monde, est le pont d’Arvida (ville Saguenay) construit en 1949-50 ;
* Ce pont a été reconnu par la Société canadienne de génie civil comme un site historique national de génie civil en 2008.

# Diapositive 20

* Il a été conçu par des ingénieurs de SNC (SNC-Lavalin maintenant) et de l’Alcan (Rio Tinto maintenant) ;
* Il a été fabriqué par Dominion Bridge à Lachine (la compagnie n’existe plus).

# Diapositive 21

* L’Al est un matériau relativement « jeune » ;
* 1790 : L'alumine a été isolée en 1754 par le chimiste allemand **Marggraf**. Louis Guyton de Morveau, collaborateur de Lavoisier, qui le baptisa alumine ;
* 1821 : Pierre **Berthier** découvre que la terre rouge du village **Les-Baux-de-Provence** contient 40 à 50% d'alumine, le reste étant de l'oxyde de fer (couleur rouge). Il l'appelle Bauxite.
* 1855 : Moulage de couverts en Al pour **Napoléon III** (plus cher que l’or).
* 1866 : Dépôt des brevets de Paul Louis Toussaint **Héroult** en France et Charles Martin **Hall** aux États-Unis permettant de dissoudre l'alumine dans de la cryolithe qui fond à plus basse température. Le bain contient 2 à 3% d'alumine **(procédé Hall-Héroult**).
* Anecdote : Hall et Héroult sont nés la même année, ils sont décédés la même année et ils ont breveté ce procédé la même année et leurs noms de famille débutent par la même lettre;
* Avant 1866, produire de l’Al coûtait très cher et la production était en petite quantité;
* 1887 : **Bayer** dépose un brevet portant sur l'extraction de l'alumine à partir de la bauxite par attaque à chaud à la soude de la bauxite;

# Diapositive 22

* 1920 : développement des méthodes d’anodisation et d’extrusion de l’Al;
* 1931 : L'Empire State Building a été le premier bâtiment à faire une utilisation majeure des composants en Al et des structures fabriquées;
* 1953 : 1er gratte-ciel en avec une façade entièrement en Al (Alcoa Buidling Pittsburgh);
* 1957 : Jean Prouvé: conçoit mur-rideau en aluminium extrudé pour Compagnie industrielle de matériel de transport (CIMT);

# Diapositive 23

* 1946 : Premier pont ferroviaire entièrement en aluminium Grasse River Bridge NY (30,5m et toujours en opération);
* 1950 : Premier pont autoroutier au monde: pont Arvida Québec; toujours en fonction (Alcan): 150 m;
* 1962 : Place Ville-Marie (parement extérieur + poutres en Al);
* 2016 : Premier pont platelage en aluminium sur poutres en acier au Canada.

# Diapositive 24 (mettre à jour ces statistiques)

* Production totale d’Al **primaire** en 2023: **70,6 Mt** (millions de tonnes) dont 38 millions de tonnes en Chine ;
* 2,9 MT au Québec (90% de la production canadienne) ; il y a une seule aluminerie hors du Québec, soit à Kitimat en C-B ;
* Alcan avait construit une usine de production d’Al et une centrale hydro-électrique.

# Diapositive 25 (mettre à jour ces statistiques)

* La production d’Al nécessite de l’énergie électrique pour effectuer l’électrolyse de l’alumine ;
* La production canadienne est pratiquement basée sur 100% d’énergie hydro-électrique de source renouvelable ;
* La Chine produit essentiellement sont électricité à partir du charbon comme en Australie;
* Les pays du golfe persique utilisent du gaz naturel.

# Diapositive 26 (mettre à jour ces statistiques)

* La production mondiale de l’acier est 27x supérieure à celle de l’Al.

# Diapositive 27 (mettre à jour ces statistiques)

* L’énergie consommée (courant continu) en 2022 est d’environ 14 kWh/kg d’aluminium au Canada. Cette énergie est en constance baisse depuis 1886.

# Diapositive 28 (mettre à jour ces statistiques)

* La demande en Al dans le secteur du bâtiment draine 26% de la production soit le même % que pour le transport ;
* L’électrification des transports nécessite d’alléger les véhicules;
* On utilise de + en + d’Al dans ce secteur.

# Diapositive 29

* L’Al est le métal le plus abondant dans la planète terre ;
* Il se retrouve sous forme d’oxyde d’alumine dans la bauxite ;
* 90% des réserves mondiales de bauxite sont concentrées dans les régions tropicales et subtropicales.

# Diapositive 30

Voici un résumé de la façon de produire des produits finis en Al ;

* Après l’extraction de la bauxite, l’alumine est produite par le procédé Bayer ;
* Le métal primaire est produit par le procédé Hall-Héroult;
* Lorsque le métal est extrait de la cuve d’électrolyse, ce dernier est à 950°C environ;
* On peut ajouter des éléments d’alliage (présenté plus loin) pour couler immédiatement des pièces moulées ou produire des lingots, des billettes ou des gueuses pour l’exportation;
* Par la suite, on transforme les lingots et billettes en produits semi-finis qui sont utilisés pour fabriquer des produits finis;
* On voit sur cette diapo le *catatug* fabriqué en Al par le Groupe Océan qui a servi à la construction du pont Samuel-de-Champlain ;
* Léger donc fiable tirant d’eau et transportable;
* On voit également ici un projet de passerelle complexe 100% en aluminium.

# Diapositive 31

* Liste des références des photos précédentes.

# Diapositive 32 (mettre à jour ces statistiques)

* En 2015, la sidérurgie produit 17% des GES au Canada ;
* Les ciments et produits de béton 14%
* La production d’alumine et d’Al 9%.

# Diapositive 33 (mettre à jour ces statistiques)

* Au Canada, on génère environ 2,7 kg de CO2e / kg d’Al ;
* L’Al recyclé en génère 0,8.

# Diapositive 34 (mettre à jour ces statistiques)

* 1% des émission de CO2e provient de la production du matériau Al ;
* 40% de ces émissions sont liés aux procédés et 61% de la génération d’électricité.

# Diapositive 35 (mettre à jour ces statistiques)

* Voici les émissions de CO2e dans le monde en 2022 (sans la production de l’alumine ;
* Le Canada est passé de 3 t de CO2e/ tonne d’Al à 2 en 10 ans;
* L’Al québécois est un Al à bas carbone;
* Le procédé ELYSIS permettra de réduire à zéro ces émissions car ce procédé émet de l’oxygène;
* ELYSIS est une coentreprise d’Alcoa, Rio Tinto, Apple et gouv. du Qc et du Canada.

# Diapositive 36

* Définition d’économie circulaire.

# Diapositive 37

* Exemple d’économie : automobile ;
* On extrait la bauxite, on produit l’alumine, on produit l’Al, on produit des composants semi-finis et on assemble ceux-ci pour produire une voiture ;
* On vend l’auto neuve ;
* Celle-ci peut être revendu plus tard ;
* À la fin de vie, on peut prélever des éléments comme pièces de seconde main ;
* Si la voiture est finie (fin de vie ou accident), on peut la déchiqueter, trier l’Al et la refondre.

# Diapositive 38

* À droite de la ligne rouge, nous avons les opérations de transformation de l’Al;
* À chaque opération il y a une chute de métal qui est récupérée;
* La récupération se fait par type d’alliage, ce qui facilite la refonte et donne une valeur accrue à ces chutes de métal par rapport à l’approche d’un seul bac pour tous les alliages;
* Il y a aussi des pertes de métal lors de la fabrication des produits finis; ces rebuts sont aussi recyclés la majorité du temps par type d’alliage;
* À la fin de vie, les produits finis sont déconstruits et l’Al de ces produits est recyclé;
* À gauche de la ligne rouge, on retrouve l’Al qui entre dans la transformation;
* Il y a deux sources : l’Al primaire et l’Al secondaire provenant des chutes de métal et de la récupération de l’Al en fin de vie;
* Comme la demande en tonnage en Al augmente et que celui-ci dure longtemps dans les ponts, mur rideau, etc., il est toujours nécessaire d’ajouter de l’Al primaire.

# Diapositive 39

* Dans la plupart des produits en aluminium, celui-ci n'est pas réellement consommé, mais simplement utilisé ;
* Le cycle de vie d'un produit en Al = berceau-à-berceau (*cradle-to-cradle*) et non berceau-à-tombe (*cradle-to-grave) ;*
* ≈ 55% de l’Al utilisé aujourd’hui pour produits semi-finis et finis provient du recyclage (chute de métal et fin de vie);
* ≈ 25-30% provient de Al en fin de vie ( «end of life »);
* Il n'y a pas de différence de qualité entre un produit entièrement en métal primaire et un produit en métal recyclé.

# Diapositive 40

* ≈ 1 milliard de tonnes d’Al en « stock » en 2020 ;
* Banque de stockage de matériaux et **d'énergie** pour une utilisation future du recyclage. En 2020:
	+ construction = 35%
	+ transport = 28%
	+ l'ingénierie et le câble = 27%
	+ Autres = 10%
* Al étant durable, il est utilisé en construction ;
* La génération d’Al fin de vie 🡺 longue période (+80 ans) ;
* Europe et Amérique du Nord utilise Al depuis longtemps 🡺 disponibilité d’Al recyclé ;
* L’utilisation en forte hausse des pays comme Chine, Inde, Brésil 🡺 prendra 80 ans avant de pouvoir être disponible.

# Diapositive 41

* Il existe deux voies de transformation de l’Al ;
* Après l’ajout d’éléments d’alliage, l’aluminium peut être coulé en lingots ou autre ou il peut être moulé selon divers procédés (moule en sable, moule permanent, sous-pression) ;
* Après l’ajout d’éléments d’alliage et le coulage de lingots, ceux-ci peuvent être laminés à chaud, puis à froid pour fabriquer des produits plats;
* Les billettes sont extrudées pour former des composants;
* Des lingots peuvent être forgés;
* Après toutes ces transformations, un traitement thermique doit être fait selon diverses recettes, pour restituer les propriétés mécaniques des composants semi-finis;
* D’autres opérations classiques sont requises par la suite pour obtenir un composant prêt à être assemblé dans un produit fini (voiture, avion, trains, passerelle, mur rideau, etc.);

# Diapositive 42

* Références de la diapositive précédente.

# Diapositive 43

* L’Al peut être transformé de diverses façons comme le laminage à froid qui permet d’amincir la tôle ;
* L’extrusion est une opération fortement utilisée pour fabriquer des produits semi-finis ;
* 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.

# Diapositive 44

* L’extrusion permet de faire des formes complexes et ce procédé peut éviter des opérations subséquentes pour produire le composant final ;
* On peut insérer des caractéristiques qui sont utiles lors de la fabrication du produit fini.

# Diapositive 45

* Voici un ensemble d’exemples de pièces extrudées.

# Diapositive 46

* Un exemple simple de produit fini composé d’éléments extrudés ;
* La matière a été placée aux endroits importants pour assurer rigidité et résistance.

# Diapositive 47

* Comme déjà mentionné, il existe différents types d’alliage d’Al ;
* Ces alliages de corroyage sont conçus afin de produire des composants répondant à des besoins spécifiques : haute résistance, très bonne conductivité électrique; dissipateur de chaleur; haute résistance à haute température, extrudabilité, résistance accrue à la corrosion, etc.;
* Les alliages sont définis en famille : 1xxx, 2xxx, etc.;
* Le deuxième chiffre représente une variation de l’alliage initial;
* Les troisième et quatrième chiffres – Numéro unique à l’alliage sans autre signification;
* L’alliage de la série 5xxx est très utilisé dans le domaine maritime pour sa haute résistance à la corrosion;
* L’alliage de la série 6xxx est très populaire en structures.

# Diapositive 48

* Sur cette diapo, on retrouve les différents types d’alliage de fonderie et leurs numérotations;

# Diapositive 49

* On a parlé de traitement thermique afin d’améliorer les propriétés mécaniques des alliages;
* Dans la nomenclature des alliages, on attache toujours un état;
* LIRE PAR LA SUITE SUR LA DIAPO

# Diapositive 50

* Cette figure illustre à différentes échelles la microstructure d’un alliage;
* Pour un élément en aluminium, si on zoom, on retrouve une structure granulaire composée de grains et joints de grains;
* Les grains ont une structure cristalline composée d’une structure atomique du type cubique à faces centrées;
* L’acier possède une structure cubique centrée mais change à cubique à faces centrées à environ 915°C.

# Diapositive 51

* Les atomes de l’élément d’alliage remplacent des atomes d’aluminium tel qu’illustré sur la figure ;
* N’ayant pas la même dimension, il s’ensuit des distorsions dans le réseau cristallin, et ces distorsions sont des entraves aux mouvements entre les plans d’atomes ;
* Conséquemment, la limite élastique (*Fy*) et la résistance à la rupture (*Fu*) augmentent alors que la ductilité diminue, d’où l’utilisation d’éléments d’alliages pour augmenter les propriétés mécaniques.

# Diapositive 52

* L’écrouissage, un travail à froid, se fait à la température de la pièce ;
* Son effet est d’aplatir et de déformer les grains dans le sens du laminage ;
* Il en résulte que lorsqu’on applique des contraintes à la plaque écrouie, le glissement des plans d’atomes est entravé par la présence de défauts générés et il faut plus d’énergie pour déformer la plaque, une fois écrouie ;
* Les limites élastique et ultime augmentent, de même que la résistance à la déformation, mais la ductilité diminue.

# Diapositive 53

* On voit sur cette figure la résistance relative entre différents alliages et l’influence sur la réduction de résistance due au soudage.

# Diapositive 54

* On voit sur cette diapositive, différents procédés d’assemblage ;
* Le soudage par friction malaxage sans métal d’apport; c’est une soudure à froid;
* Soudage classique MIG et TIG avec un fil d’apport ;
* Soudage au laser et plasma avec un fil d’apport ;
* Pour les assemblages mécaniques, nous avons
	+ Visserie;
	+ Rivetage;
	+ Replis;
	+ Organes d’assemblage rapide et clips;
	+ Boulonnage;
* On peut utiliser des adhésifs également seul ou hybride.

# Diapositive 55

* On voit sur cette figure le soudage par le procédé MIG ou TIG génère une zone affectée thermiquement ZAT (ZTA parfois en français et HAZ (*Heat Affected Zone*) en anglais) ;
* Étant donné que la conductivité de l’Al est élevée, la ZAT est relativement grande ;
* Pour connaître les propriétés mécaniques des ZAT des tests de tractions sont faits.

# Diapositive 56

* Il existe des façons de contrer les effets du soudage MIG et TIG ;
* On peut limiter l’apport en chaleur en la diffusant dans le montage de soudage ;
* Localiser les soudures à des endroits où les contraintes sont faibles.

# Diapositive 57

* On voit ici le pont de St-Ambroise construit en 2015 : platelage en aluminium sur 5 poutres en acier galvanisé ;
* Ce platelage remplace une dalle de béton ou un platelage en bois;
* On estime sa durée de vie à 75 ans;
* Le platelage étant 100% étanche, il protège la structure du pont contre l’infiltration d’eau (ce que ne permet pas le béton et le bois);
* Le platelage est constitué d’extrusions (de 305 mm de large) soudées entre elles par FSW;
* C’est le 2ième pont au Québec qui inclut de l’Al.

# Diapositive 58

* On a vu que les propriétés mécaniques de l’Al sont moindres dans les zones affectées thermiquement lors du soudage MIG et TIG;
* Cependant l’Al peut être soudé par un procédé à froid appelé soudage par fiction malaxage, communément appelé FSW (*Friction Stir Welding*);
* Voici une démonstration du FSW.

# Diapositive 59

* Il est possible de faire des traitements de surface à l’Al pour des raisons d’esthétisme ;
* L’anodisation permet de colorer les surfaces ;
	+ Par un procédé électrochimique, on augmente l’épaisseur de la couche d’alumine qui a une forme alvéolaire dans laquelle des pigments de peinture se logent;
	+ L'anodisation dure permet d'augmenter la résistance à l'abrasion de la pièce;
* **Revêtements organiques**:
	+ Peinture électrostatique acrylique, polyester;
	+ Polyuréthane;
	+ Revêtement de haute performance;
* **Finis mécaniques**
	+ **Brossage**
		- Procédé mécanique qui consiste à créer de fines rayures afin d'éliminer les défauts de surface;
	+ **Polissage**
		- Une amélioration des performances mécaniques en supprimant des défauts de surface;
		- Une surface lisse, brillante ou mate, qui procure au produit une meilleure finition.

# Diapositive 60

* La figure suivante illustre une courbe contrainte – déformation classique de l’Al ;
* On peut obtenir le module de Young de cette courbe ;
* Étant donné que la limite élastique n’est pas aussi franche que l’acier, à 0,2% de déformation ($ε$ = 0,002), on trace une ligne parallèle au module de Young et l’intersection avec la courbe permet d’identifier la limite élastique;
* De cette limite nous avons par la suite la phase plastique du métal soit l’écrouissage de l’Al suivi de la rupture;
* Le point C délimite la zone de striction, (diminution localisée de la section de l’éprouvette d’Al);
* Le point D est le point de rupture;
* On remarque que le module de Young de l’Al est 2,86 fois inférieur à celui de l’acier (200000 / 770000 = 2,86); cela affecte la rigidité de la structure;
* Le module de cisaillement de l’Al est 2,96 fois inférieur à celui de l’acier (77000 / 26000 = 2,96); cela affecte la rigidité de la structure;
* Cette perte peut être compenser en augmentant la surface de l’Al :
	+ En flexion (EI)acier =(EI)Al on aura (Inertie)Al = 2,86 x (Inertie)acier
	+ En axial (EA)acier =(EA)Al on aura (A)Al = 2,86 x (A)acier
	+ En torsion (GJ)acier =(GJ)Al on aura (module de torsion)Al = 2,96 x (module de torsion)acier (G module de cisaillement )

# Diapositive 61

* Le coefficient de Poisson est de 0,33 versus 0,3 pour l’acier ;
* Le module de cisaillement de l’Al est 26 000 MPa.

# Diapositive 62

* On trouve ici différentes propriétés physiques de l’Al en comparaison avec l’acier ;
* On note que l’Al est 2,9 x plus léger que l’acier ;
* Le point de fusion est de 660 comparativement à 1500°C ;
* L’Al se dilate/contracte 2 x plus que l’acier ; il faut avoir cela en tête pour de l’Al utilisé dans le climat québécois car on peut subir des écarts de 80-90°C ;
* L’Al est 5 x moins résistif que l’acier; on l’utilise d’ailleurs dans les lignes de transport électrique à très haut voltage; moins lourd que le cuivre et beaucoup moins cher;

# Diapositive 63

* Souvent on utilise la mesure de dureté comme mesure rapide de résistance car elle a un lien direct avec la contrainte ultime *Fu*;
* Mesurée à l’aide de l’essai Brinell, Rockwell ou Vickers;
* Estimée rapide et approximatif de *Fu;*
* Résilience
	+ C’est une mesure de la ductilité ou de la capacité d’un matériau à résister aux chocs ;
	+ Aussi une mesure de la fragilité du matériau à basse température ;
	+ Mesurée à l’aide de l’essai Charpy;
	+ L’aluminium est très résiliant : applications cryogéniques ;
	+ La mesure de la résilience des alliages d’aluminium n’est généralement pas requise dans les normes de calcul alors qu’elle l’est pour l’acier.

# Diapositive 64

* Rupture par fatigue : des mesures très précises de la déformation démontrent que chaque chargement dans le domaine élastique **entraîne une petite extension plastique** principalement aux endroits où il y a une **concentration de contraintes**. Si la contrainte induite est suffisamment grande et que le nombre de cycles de chargement et de déchargement est suffisant, **le durcissement s’accroît, causé par l’alternance des petites déformations plastiques**. Éventuellement, **la plasticité du métal est épuisée à un endroit donné et une amorce de fissure microscopique se forme**. La fissure croît graduellement avec les cycles de chargement pour, finalement, **entraîner la rupture de la pièce**. Ainsi, des pièces en alliages d’aluminium soumises à des cycles répétés de charges peuvent se **fissurer** de façon inattendue **à des niveaux de contraintes inférieures à la limite élastique**.

# Diapositive 65

* La résistance à la fatigue d’une pièce est définie comme le nombre de cycles de chargement avant la rupture (*N*) pour une différence de contraintes ($∆σ$) donnée. On définit la différence des contraintes cycliques comme la **différence algébrique** entre la contrainte maximales ($σ\_{max}$) et la contrainte minimale ($σ\_{min}$).

# Diapositive 66

* Cette figure est une courbe (double logarithme) dite « S-N » ;
* Elle donne la relation entre le nombre de cycles avant la rupture en fatigue et l’écart de contrainte amenant la rupture;
* Cette courbe peut varier d’un alliage à un autre;
* Elle changera en fonction de la température de même qu’elle sera différente dans les ZAT par rapport au matériau de base;
* Pour donner une idée du nombre de cycles d’une structure, un pont situé sur une route très passante subira 93,1×106 cycles chargement sur 75 années de durée de vie.

# Diapositive 67

* Les alliages d’Al peuvent se corroder de différentes façons ;
* La tenue à la corrosion dépend de plusieurs paramètres :
	+ La composition de l’alliage, l’état métallurgique, et l’état des surfaces des alliages ;
	+ Les caractéristiques du milieu dans lequel ils sont exposés ;
	+ Les conditions de services prévues ;
	+ Les dispositions constructives ;
	+ La durée de l’ouvrage ;
	+ La fréquence et le type d’entretien.

# Diapositive 68

* Couche d’oxyde naturelle :
	+ Rend l’Al passif à son environnement ;
	+ Le film se forme rapidement dès que le métal est mis en contact avec l’air (milieu oxydant) ;
	+ Le film se reforme rapidement après la mise en forme ou le soudage ;
	+ La stabilité physico-chimique du film dépend :
		- Des caractéristiques du milieu ;
		- Du pH ;
		- De la nature de l’alliage.

# Diapositive 69

* Les différentes formes de corrosion sont :
	+ La corrosion généralisée (ou uniforme);
	+ La corrosion par piqûres ;
	+ La corrosion transcristalline et celle intercristalline;
	+ La corrosion sous contrainte;
	+ La corrosion feuilletante;
	+ La corrosion filiforme;
	+ La corrosion à la ligne de l’eau;
	+ La corrosion sous dépôt (pou caverneuse);
	+ La corrosion galvanique.

# Diapositive 70

* Voici un exemple de corrosion feuilletante sur le pont d’Arvida ;
* Elle se produit sur un métal très écroui ayant des grains très aplatis résultant du laminage.

# Diapositive 71

* On voit sur cette diapositive le résultat d’un test au brouillard salin d’un assemblage de brides de raccord en Al avec des boulons en acier inoxydable série 300 ;
* La durée du test est de 5000 heures soit 208 jours; c’est un test très sévère qui permet de comparer des solutions qui permettent de contrer la corrosion.

# Diapositive 72

* Contact avec le béton et autres matériaux de construction
	+ Contacts avec béton, bois, polymères ou plâtre : pas condition propice à la corrosion;
	+ Contact avec le béton:
	+ l’Al résiste très bien à la corrosion;
	+ Béton ternit la surface d’Al;
	+ Contact avec béton armé:
		- Corrosion galvanique due à la présence de l’acier;
	+ Corrosion accélérée par la présence d’eau et de chlorures.

# Diapositive 73

* Cette figure donne des indications sur des dispositions constructives qui permettent de contrer la corrosion.

# Diapositive 74

* Nous débutons ici, une série d’exemples d’utilisation de l’Al dans les constructions ;
* À proximité du mat du stade Olympique et du Biodôme, le Planétarium Rio Tinto Alcan a obtenu la certification LEED NC Platine. Les deux cônes en aluminium représentent des télescopes pointant vers le ciel et le toit vert fait référence à une chaude nuit d’été étendu dans l’herbe. Les courbes s’inspirent des planètes et le choix de matériaux nobles rappelle la nature.

# Diapositive 75

* Parement **du dôme:** bardage d’Al;
* Tôle d’aluminium : 1mm d’épaisseur ;
* Texture : fini stucco ;
* Fini : aluminium naturel ;
* Parement **du toit :** plaque d’aluminium à joint d’about;
* Plaque d’aluminium : alliage 5005, 3 mm d’épaisseur;
* Système de fixation : en profilé d’aluminium, alliage 6063-T5, 3 mm d’épaisseur.

# Diapositive 76

* Une partie des estrades du stade de football de l’Université Laval est en aluminium.

# Diapositive 77

* Le premier pont routier en aluminium au monde a été construit à Arvida (ville Saguenay)
* Conçu par SNC et Alcan ; (SNC-Lavalin et Rio Tinto maintenant ;
* Fabriqué par Dominion Bridge à Lachine (fermé);
* Construit en 1950 ;
* Alliage série 2xxx ;
* Portée de l’arche 88 mètres ;
* Portée totale : 150 m ;
* Aucune réparation depuis 1950 ; les zones corrodées sont en contact avec le béton ;
* Platelage en béton remplacé 2 x ;

# Diapositive 78

* Grasse River Bridge;
* Conception : Alcoa et Hardesty and Hanover ;
* Fabrication: Bethlehem Steel Company;
* Propriétaire: Massena Terminal Railroad (MSTR) (G&W depuis 2012)
* Objectif: démontrer les propriétés structurales de l’aluminium dans les ponts;
* La travée principale sur la rivière est la seule voie ferrée entièrement en aluminium des États-Unis. Construit par Alcoa (desservi par le MSTR) en 1946 dans le cadre d’une relocalisation de lignes afin de démontrer les propriétés structurelles de l’aluminium pour la construction de ponts. Le reste du pont a été fabriqué par Bethlehem Steel Co. et est en acier standard.
* 7 portées de 100 pieds (30,5m) dont une Al;
* Alliage 2014 fourni par Alcoa;
* Al: 53 000 livres (23,6t); acier: 128 000 livres (58,2 t)
* Al**: H = 10’** (3,04 m); acier: **H= 9’** (2,74m)
* Charge de conception: Cooper E-60 (267,5 kN)

# Diapositive 79

* Schwansbell Bridge Allemagne;
* Construit en 1955 ;
* Portée : 44,2 m;
* Largeur : 5,1 m;
* Capacité: 12t;
* Masse du pont: 25t;
* Alliage: 6082 T6 (dans CAN/CSA S6-14);
* Aucun entretien nécessaire sur la structure ;
* Le pont était toujours en place en 2020.

# Diapositive 80

* Millenium Bridge London ;
* Millenium Bridge Gateshead;
* Légèreté de l’Al : ce pont se lève pour laisser passer les bateaux.

# Diapositive 81

* Passerelle de 44 mètres de longueur et 4,7 m. de large ;
* Masse 20 000kg
* Installer en 6 heures.

# Diapositive 82

* Passerelle Wellington, canal Lachine, Parcs Canada;
* Temps de fermeture de la piste cyclable : 3 semaines pour la démolition et la reconstruction.

# Diapositive 83

* Il existe des composants en aluminium qui servent à supporter des formes en bois afin de couler du béton ;
* La photo de gauche montre un système qui permet de coulée la partie en porte-à-faux une dalle de béton armée d’un pont;
* La photo du centre est un système de reprise des charges de gravité pour la coulée d’un portique en béton;
* La photo de gauche est le système « Aluma » en aluminium pour le coulage de structure en béton arme.

# Diapositive 84

* Fabricant : Unisson
* Largeur : 65 m
* Profondeur : 18m
* Hauteur : 26m
* Poids : 90 000 kg
* Alliage : 6061-T6
* Assemblage mécanique précis et rapide.

# Diapositive 85

* Autres applications
	+ Signalisation routière;
	+ Feux de circulation et lampadaire;
	+ Abris-bus.

# Diapositive 86

* Œuvre d’art applications;
* Vaulted Willow; Marc Fornes, Permanent Public Art Pavilion | Borden Park, Edmonton;
* Composé de feuilles d’aluminium anodisées et assemblées sur place avec des rivets.

# Diapositive 87

* Conclusion

# Diapositive 88

* Partenaires

# Diapositive 89

* Remorque en aluminium.

# Diapositive 90

* Remorque en aluminium.

# Diapositive 91

* Remorque en aluminium.

# Diapositive 92

* Simulation de crash d’une glissière de sécurité attacha à un platelage de pont en aluminium.

# Diapositive 93

* Roman de Jules Verne (1865) qui parle d’aluminium qui se base sur une « histoire » vrai de la production de l’aluminium en 1854.

.