

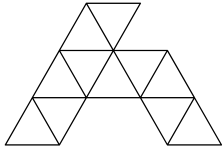
Document de support à la présentation :

Introduction au matériau aluminium Révision 2025

Contenu développé par :

Mario Fafard

AluQuébec



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 2

- Le contenu se veut un survol de Beaulieu, « Les caractéristiques de l'aluminium structural » 2^{ème} édition, Pral.

Diapositive 4

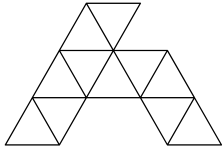
- Voici quelques avantages liés à l'Al :
- L'aluminium étant plus léger que l'acier et le béton, il peut, dans certain cas, nécessiter des fondations plus légères et parfois, dans certaines situations, comme dans le cas des passerelles, il permet d'éviter l'utilisation de pieux aux profits de semelles 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 une variété de procédés ;
- Une formabilité tant à froid qu'à chaud facilite la fabrication par des procédés de formage, laminage, extrusion standard ou sur mesure 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 l'excellente résistance à la corrosion atmosphérique de son fini brut, pas besoin de couche de protection pour assurer l'intégrité structurale ;
- L'image présente une pièce moulée en aluminium à la base d'un poteau extrudé en aluminium servant à la signalisation routière.

Diapositive 6

- L'aluminium s'oxyde **instantanément au contact de l'air**. Cette réaction, contrairement au cas du fer, conduit à la formation d'**alumine** (Al_2O_3) 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), mais étanche ;



ALU-COMPÉTENCES

- Une rayure faite en surface enlèvera la couche d'alumine. L'aluminium exposé à l'air s'oxydera à nouveau reformant ainsi une nouvelle couche protectrice ;
- On peut dire que l'Al s'autorépare 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 aussitôt protégeant à nouveau l'aluminium contre la corrosion sans nécessité d'application d'une couche de peinture ou autre système anti-corrosion.

Diapositive 7

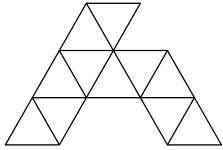
- Cet exemple illustre des tests au brouillard salin (5000 heures ou 208 jours d'exposition) faits sur l'acier du pont de Québec protégé avec le système Galvatech (homologuée MTQ et MTO) ;
- Peu importe le système protecteur, aussitôt que la surface est égratignée, la corrosion débute et, pour l'arrêter, cela nécessite une intervention humaine parfois coûteuse.

Diapositive 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 aluminium.

Diapositive 9

- Plus il fait froid, plus les propriétés de l'aluminium augmentent ;
- Contrairement à l'acier, l'aluminium ne perd pas de ténacité à basse température ;
- On utilise beaucoup l'aluminium pour des applications cryogéniques, aéronautiques et aérospatiales où les températures sont très basses, d'autant plus que l'aluminium est léger ;
- L'aluminium demeure résilient à basse température alors que l'acier devient fragile ;
- Notons que la structure cristalline de l'aluminium est du type cubique à faces centrées alors que celle de l'acier est du type cubique à corps centré ; c'est ce qui explique la différence de tenue mécanique au froid.



ALU-COMPÉTENCES

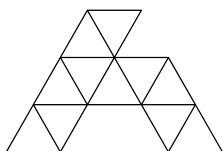
Diapositive 10

- Recyclage : avec un triage d'alliage adéquat et un décapage des rebuts, 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'aluminium a une grande conductivité tant électrique que thermique ; les lignes de haute tension sont en aluminium et non en cuivre (trop cher et trop lourd) ;
- Esthétisme (polissage, brossage, anodisation 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 ($\$_{\text{acier}} < \$_{\text{aluminium}} < \$_{\text{inox}}$) ;
- La tenue à des températures $> 150^{\circ}\text{C}$; étant donné son point de fusion de l'ordre de 600°C , les propriétés mécaniques diminuent rapidement avec l'augmentation de température ;
- Résistance un peu plus faible que l'acier, Ealu le tiers de Eacier ➔ pas utilisable partout ; l'aluminium n'est pas un bon choix pour une structure occupant un espace confiné ;
- Plus grande susceptibilité au voilement local et au flambage global ;
- Vérifier les vibrations : pour une même rigidité, une structure en aluminium 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 d'une structure en aluminium sera plus élevée que celle en acier ;
- Ce n'est généralement pas un désavantage mais il faut garder cela en tête lors de la conception ;
- La plupart du temps c'est favorable ;
- Soudage – Zone Affectée Thermiquement : réduction des résistances en statique et en fatigue ;
- La soudure MIG ou TIG nécessite l'utilisation d'un gaz inerte car l'aluminium est très réactif à l'air (+ cher).
- Pour intégrer ces différences dans la conception de structures civiles, deux normes nationales détaillent le calcul de résistance : CSA S157-17 et CSA S6-25 chapter 17.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 12

- La production de l'aluminium primaire nécessite une forte quantité d'énergie mais l'énergie pour refondre et retraiter 1 kg d'aluminium secondaire (recyclé) $\approx$ 5% de l'énergie pour produire 1 kg d'aluminium primaire ;
- Émission de CO_{2e} 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 différents en contact avec un électrolyte, un agit comme une anode qui se sacrifie et se corrode et l'autre agit comme une cathode ;
 - L'anode sera le métal le plus électronégatif ;
 - L'aluminium est plus électronégatif que l'acier donc, au contact de celui-ci, il se corrodera ;
 - Il existe des solutions qui évitent ce phénomène : bris électrique, revêtement et/ou galvanisation de l'acier avec du zinc qui présente une électronégativité similaire à l'aluminium.

Diapositive 13

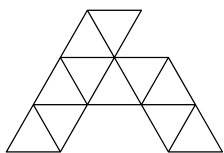
- On peut trouver dans un bâtiment des composants en aluminium un peu partout comme les portes, fenêtres, mur rideaux, panneaux solaires, etc. ;
- Notons qu'environ 25 à 30 % de l'aluminium produit se retrouve dans le secteur du bâtiment.

Diapositive 14

- On peut donner du volume à l'aluminium pour donner une texture à celui-ci ;
- L'aluminium peut être brossé comme fini de surface ;
- On voit à droite une toiture avec un bardeau en aluminium installé en 2003 ;
- La photo a été prise en 2020 et on remarque aucune dégradation sur 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 composantes en aluminium servent d'ossature pour les panneaux solaires : durables et légers.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 16

- L'aluminium est fortement utilisé dans les murs rideaux, les 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 aluminium, léger et facilite son opération ;
- À droite, on voit un parement extérieur fait de 15 000 disques en aluminium.

Diapositive 18

- À gauche, un autre exemple de parement extérieur texturé où l'aluminium est déployé selon un patron non uniforme ;
- L'aluminium poli (fini miroir) recouvre un bâtiment appartenant à Amag (TopBright) en Autriche ;
- L'aluminium garde un niveau de réflectance élevé pour une large gamme de longueur d'ondes.

Diapositive 19

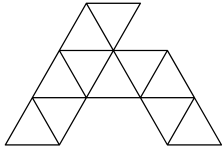
- Le premier pont autoroutier en aluminium au monde est le pont d'Arvida (ville Saguenay, Qc) construit en 1949-50 ;
- Ce pont a été reconnu par la Société canadienne de génie civil comme un site historique national de génie civil en 2008.

Diapositive 20

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

Diapositive 21

- Alors que la fabrication de l'acier remonte à -700 av. J.C. en Chine, l'aluminium est un matériau relativement « jeune » ;
- Mentionnons donc les dates et les événements charnières en orange ;



ALU-COMPÉTENCES

- 1886 : Anecdote : Hall et Héroult sont nés la même année, sont décédés la même année, ont breveté ce procédé la même année et leurs noms de famille débutent par la même lettre « H » ;
- Avant 1886, produire de l'aluminium coûtait très cher et la production était en petite quantité.

Diapositive 22

- 1903 : Avec sa résistance spécifique l'aluminium est donc présent dès le début en aéronautique ;
- 1931 : Début de l'introduction de l'aluminium dans les bâtiments.

Diapositive 23

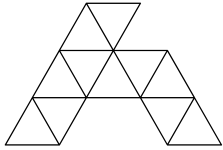
- 1946 : Cette travée unique d'un pont ferroviaire est toujours en opération ;
- 1950 : Le choix d'alliage de ces premières structures d'aluminium (2014-T6) n'est cependant pas optimal du point de vue corrosion/longévité ;
- 1991 : Le soudage par friction malaxage est un procédé automatisé qui assemble des pièces d'aluminium à l'état solide ;
- 2016 : Projet pilote du MTMD.

Diapositive 24

- Production totale d'aluminium **primaire** en 2023 : **70,6 Mt** (millions de tonnes) dont plus de la moitié (41.7 millions de tonnes) en Chine ;
- Québec : 2,9 Mt, 4^{ème} producteur mondial, 90% de la production canadienne et 80% de la production nord-américaine ; il y a une seule aluminerie canadienne hors du Québec, soit à Kitimat en C-B ; Alcan a construit une usine de production d'aluminium et une centrale hydro-électrique.

Diapositive 25

- La production d'aluminium primaire 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 son électricité à partir du charbon comme en Australie ;
- Les pays du golfe persique utilisent du gaz naturel.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 26

- La production mondiale de l'acier, en tonnes métriques, est 27 fois supérieure à celle de l'aluminium mais 9 fois en volume.

Diapositive 27

- L'énergie consommée (courant continu) en 2023 est d'environ 15 kWh/kg d'aluminium au Canada. Cette énergie est en constance baisse depuis 1886.

Diapositive 28

- La demande en aluminium 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 plus en plus d'aluminium dans le secteur des transports.

Diapositive 29

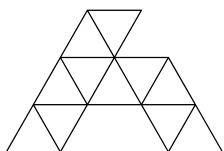
- En 2015, la sidérurgie (acier) produit 17% des GES au Canada ;
- Les ciments et produits de béton 14% ;
- La production d'alumine et d'aluminium 9%.

Diapositive 30

- Ce tableau montre l'empreinte carbone de la production mondiale d'aluminium ;
- Au Canada, l'électrolyse ne génère qu'environ 2,0 kg de CO_{2e} / kg d'Al avec l'électricité provenant de source renouvelable ;
- Notons que recycler l'aluminium ne génère que 0,8 kg de CO_{2e} / kg d'Al.

Diapositive 31

- Seulement 10.6% de l'empreinte provient du procédé direct dans lequel l'oxygène de l'alumine réagit avec les anodes pour s'échapper en CO₂ ;
- 61% de l'empreinte provient indirectement de la génération d'électricité utile au procédé ;
- Notez que le transport est l'activité qui génère le moins d'émissions.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 32

- Voici la répartition dans le monde des émissions de CO_{2e} pour l'électrolyse (sans la production d'alumine) ;
- Le Canada est passé de 3 t de CO_{2e}/ tonne d'Al à 2 t en 10 ans ;
- L'aluminium québécois est un aluminium à bas carbone ;
- Le procédé ELYSIS, tablant sur des électrodes inertes, permettra de réduire à zéro les émissions directes du procédé en émettant de l'oxygène au lieu du CO₂ ;
- ELYSIS est une coentreprise d'Alcoa, Rio Tinto, Apple, gouvernement du Qc et gouvernement du Canada.

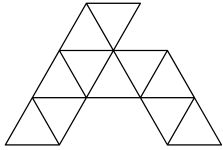
Diapositive 33

- L'aluminium 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 exploitables de bauxite sont concentrées dans les régions tropicales et subtropicales.

Diapositive 34

Voici un résumé de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'aluminium, de la bauxite aux produits finis :

- Après l'extraction de la bauxite, l'alumine est produite par le procédé d'affinage Bayer ;
- L'alumine est transformée en aluminium primaire par le procédé d'électrolyse Hall-Hérault ;
- Lorsque le métal est extrait de la cuve d'électrolyse, ce dernier est liquide à $\approx 950^{\circ}\text{C}$;
- On peut couler immédiatement des gueuses ou des lingots en T de métal pur pour l'exportation ou ajouter des éléments d'alliage (présenté plus loin) pour couler et produire des billettes d'extrusion, des lingots de laminage ou des lingots de fonderie ;
- Par la suite, on transforme les billettes et les lingots en produits semi-finis qui sont utilisés pour fabriquer des produits finis ;
- On voit sur cette diapo le *catatug* fabriqué en aluminium par le Groupe Océan qui a servi à la construction du pont Samuel-de-Champlain ;
- Léger donc faible tirant d'eau et transportable ;
- On voit également ici un projet de passerelle complexe en aluminium.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 35

- Liste des références des photos précédentes.

Diapositive 36

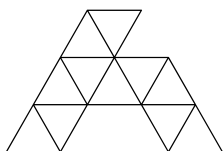
- Il existe deux voies de transformation et de type d'alliage d'aluminium ;
- À droite, après l'ajout d'éléments d'alliage de fonderie, l'aluminium peut être coulé en lingots de fonderie pour être moulé selon divers procédés (moule au sable, moule permanent, sous-pression) ; Exemple 2 bloc moteur, exemple 5 patte de banc de parc.
- À gauche, après l'ajout d'éléments d'alliage de corroyage, l'aluminium peut être coulé en lingots de laminage ou en billettes pour être respectivement laminés en produits plats ou extrudés en profilés ou en produits forgés ; Exemple 1 bobines de métal en feuille, exemple 3 profilés 20x20 pour le secteur industriel ;
- Après toutes ces transformations, un traitement thermique doit être fait selon diverses recettes pour optimiser 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, train, passerelle, mur rideau, etc.).

Diapositive 37

- Références de la diapositive précédente.

Diapositive 38

- Les deux façons les plus communes de transformer les alliages de corroyage sont le laminage et l'extrusion ;
- Le laminage consiste à aplatir à chaud un lingot puis à rouler à froid la plaque de laminage pour amincir davantage le métal et exercer un travail d'écrouissage.
- L'extrusion consiste à forcer, à chaud à l'aide d'une presse, le passage du métal d'une billette dans une filière pour former des profilés ; un peu comme pour de la plasticine ;
- On part d'une billette d'un diamètre communément entre 7 et 9 pouces ; cette taille influence directement la capacité dimensionnelle des extrudeurs ;
- On chauffe la billette de 350 à 500°C selon le type d'alliage ; on refroidi rapidement le profilé à la sortie de la presse puis on traite les profilés redressés et coupés avec



ALU-COMPÉTENCES

un traitement thermique de vieillissement pour apporter un durcissement par précipitation.

Diapositive 39

- Les profilés extrudés sont grandement utilisés dans les bâtiments et les structures civiles ; examinons-les de façon plus détaillée ;
- L’extrusion permet de faire tout autant des formes standards que complexes et ce procédé peut mener à une intégration de pièces qui simplifiera l’assemblage final ;
- On peut également insérer des caractéristiques qui sont utiles lors de la fabrication du produit fini.

Diapositive 40

- Voici un ensemble d’exemples de pièces extrudées.

Diapositive 41

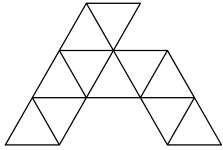
- Une estrade dans un parc fournit un exemple simple de produit fini composé d’éléments extrudés standards et sur mesure ;
- Dans chaque type de profilé, la matière a été placée aux endroits importants pour assurer rigidité et résistance ainsi que pour faciliter l’assemblage.

Diapositive 42

- Définition d’économie circulaire.

Diapositive 43

- Exemple d’économie circulaire : automobile ;
- On extrait la bauxite, on produit l’alumine, on produit l’aluminium, on produit des composants semi-finis et on assemble ceux-ci pour produire une voiture ;
- On vend l’auto neuve ;
- On entretient et répare l’auto (au lieu de la jeter) ;
- Celle-ci peut être revendue et réutilisée plus tard (au lieu de la jeter) ;
- À la fin de vie, on peut prélever certains éléments comme pièces de seconde main (au lieu de tout jeter) ;
- À la fin de vie, on peut trier les matériaux du reste des pièces, les déchiqueter et refondre l’aluminium et l’acier (au lieu de tout jeter).



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 44

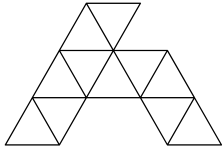
- À droite de la ligne rouge, nous avons les opérations de transformation de l'aluminium ;
- À chaque opération, il y a une chute de métal qui est récupérée (rebuts industriels);
- La récupération se fait par type d'alliage, ce qui facilite la refonte et donne une valeur accrue à ces chutes de métal 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 (rebuts industriels) ; 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'aluminium de ces produits est recyclé (rebut post-consommation) ;
- À gauche de la ligne rouge, on retrouve les opérations de production d'aluminium ;
- Il y a deux sources : l'aluminium primaire et l'aluminium secondaire provenant des chutes de métal et de la récupération en fin de vie ;
- Comme la demande en tonnage d'aluminium augmente, que celui-ci dure longtemps dans les ponts, mur rideau, etc. et que le taux d'aluminium post-consommation recyclé n'est pas de 100%, il est toujours nécessaire d'ajouter de l'aluminium primaire.

Diapositive 45

- Pour beaucoup de produits en aluminium, celui-ci ne sera pas réellement consommé en fin de vie, mais simplement utilisé ;
- Le cycle de vie d'un produit en Al = berceau-à-berceau et non berceau-à-tombe ;
- ≈ 55% de l'Al utilisé aujourd'hui pour produits semi-finis et finis provient du recyclage (rebut industriel + rebut post-consommation) ;
- ≈ 25-30% provient de Al en fin de vie (rebut post-consommation) ;
- Il n'y a pas de différence de qualité entre un produit entièrement en métal primaire et un produit en métal recyclé.

Diapositive 46

- ≈ 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%



ALU-COMPÉTENCES

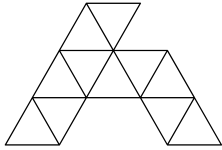
- Transport = 28%
 - L'ingénierie et le câble = 27%
 - Autres = 10%
- Al étant durable, il est utilisé en construction ;
- La génération d'Al fin de vie → longue période (+80 ans) ;
- Europe et Amérique du Nord utilise Al depuis longtemps → disponibilité d'Al recyclé ;
- L'utilisation en forte hausse des pays comme Chine, Inde, Brésil → prendra 80 ans avant de pouvoir être disponible.
- Par comparaison l'aluminium dans les cannettes a un cycle de vie qui se compte en semaines/mois, le recyclage (UBC) se fait d'ailleurs en boucle fermée.

Diapositive 47

- Comme on a déjà mentionné, il existe deux types d'alliage d'aluminium ;
- Le premier groupe, les 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, formabilité, résistance accrue à la corrosion etc. ;
- Les alliages sont définis en famille : 1xxx, 2xxx, etc. ; certaines familles traitables thermiquement d'autres non ; le premier chiffre indiquant l'élément d'alliage dominant ;
- Le deuxième chiffre représente une variation/évolution de l'alliage initial ;
- Les troisièmes et quatrièmes chiffres forment un numéro unique à l'alliage sans autre signification ;
- Les alliages de la série 5xxx, principalement disponibles en plaques et feuilles, sont très utilisés dans le domaine maritime pour leur excellente soudabilité et leur haute résistance à la corrosion en milieu salin ;
- Les alliages de la série 6xxx, principalement disponibles en profilés extrudés, sont très populaires en structure.

Diapositive 48

- Le deuxième groupe concerne les alliages de fonderie conçus pour favoriser le remplissage des cavités des moules et l'atteinte des propriétés mécaniques désirables sans autre forme d'écrouissage (ils pourront recevoir des traitements thermiques) ;



ALU-COMPÉTENCES

- Leur nomenclature suit des principes similaires aux alliages de corroyage ;
- L'alliage A356 est de loin le plus répandu ; le secteur automobile révolutionne la manière de couler des pièces avec les « mega-casting ».

Diapositive 49

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

Diapositive 50

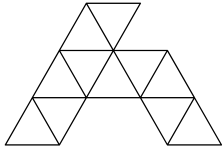
- Cette figure illustre à différentes échelles la microstructure d'un alliage ;
- Pour un élément en aluminium, si on zoom, on retrouve une structure granulaire composée de grains et joints de grains ;
- Les grains ont une structure cristalline composée d'une structure atomique du type cubique à faces centrées avec l'aluminium ;
- L'acier possède une structure cubique à corps centrés 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 (F_y) et la résistance à la rupture (F_u) augmentent alors que la ductilité diminue, d'où l'utilisation d'éléments d'alliages pour augmenter les propriétés mécaniques ;
- Le tableau montre donc l'influence grandissante sur les résistances mécaniques et l'allongement à la rupture qu'a la concentration d'un élément d'alliage typique comme le magnésium.

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 ;



ALU-COMPÉTENCES

- 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 ;
- Le tableau montre l'effet de différents niveaux d'écrouissage sur les propriétés mécaniques pour l'alliage 1100 ;
- Attention ! Ces gains dus à l'écrouissage peuvent être dissipés par de la chaleur.

Diapositive 53

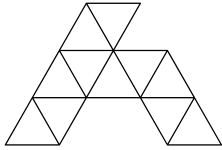
- Certains éléments d'alliage ne sont solubles dans la matrice solide d'aluminium qu'à hautes températures ; exemple diagramme de phases aluminium – cuivre ;
- On peut donc trapper ces éléments dans la solution solide en refroidissant rapidement ; si on refroidit lentement les précipités se formeront de manière plus grossière et pourront migrer aux joints de grain = état recuit b) ;
- Ensuite, on peut doser leur précipitation pour maximiser l'impact sur les propriétés mécaniques ; cela se produit lorsqu'une fine pluie de petits précipités se forment ; si on survieillit e), on retrouvera un état similaire au recuit ;
- La séquence typique est donc mise en solution a), trempe c) et vieillissement d) ;
- Le tableau montre l'effet de ces traitements thermiques sur les propriétés mécaniques du 6061, alliage typique des profilés structuraux. Notons que le soudage affecte grandement les alliages traités thermiquement.

Diapositive 54

- On voit sur cette figure la résistance relative entre différents alliages et l'influence sur la réduction de résistance due au soudage. Les alliages qui sont simplement écrouis perdront moins de résistance ultime au soudage que ceux qui sont simplement traités thermiquement. Il y a probablement une erreur concernant le 5083-H18 qui n'existe pas, lire plutôt 5083-H321.

Diapositive 55

- On voit sur cette diapositive, différents procédés d'assemblage ;
- Soudage classique MIG et TIG avec un fil d'apport (#1 à gauche et #2) ;
- Le soudage par friction malaxage sans métal d'apport (#1 à droite) ; c'est une soudure à l'état solide ;



ALU-COMPÉTENCES

- Soudage au laser et plasma avec ou sans fil d'apport ;
- Notons que certains alliages d'aluminium sont réputés « non-soudables » ; Exemple 2014 (pont d'Arvida), 7075 (aéronautique) ;
- Pour les assemblages mécaniques, nous avons
 - Visserie;
 - Rivetage;
 - Replis;
 - Organes d'assemblage rapide et clips;
 - Boulonnage;
- On peut également utiliser des adhésifs seuls ou en combinaison avec d'autres moyens d'assemblage ; une préparation de la surface de l'aluminium sera essentielle à la performance et la longévité du joint collé.

Diapositive 56

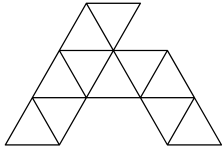
- On voit sur cette figure le soudage par fusion ; le procédé MIG ou TIG génère une zone affectée thermiquement ZAT (ZTA parfois en français et HAZ (*Heat Affected Zone* en anglais) ;
- Étant donné que la conductivité de l'aluminium est élevée, la ZAT est relativement grande ;
- Pour connaître les propriétés mécaniques dans la ZAT, des tests de tractions sont faits. La fissuration se produit généralement à côté du joint soudé, là où l'aluminium est demeuré solide mais où il a subi une mise en solution partielle suivi d'un refroidissement trop lent.

Diapositive 57

- 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 ; attention toutefois aux distorsions de l'assemblage ;
- Localiser les soudures à des endroits où les contraintes sont faibles.

Diapositive 58

- On voit ici le pont de St-Ambroise construit en 2015 : platelage en aluminium sur 5 poutres en acier galvanisé ;
- Le platelage en aluminium remplace une dalle de béton ou un platelage en bois ;
- On estime sa durée de vie à 75 ans ;



ALU-COMPÉTENCES

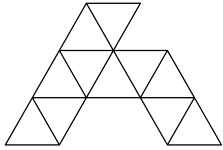
- Le platelage étant 100% étanche, il protège la structure du pont contre l'infiltration d'eau (ce que ne permet pas le béton et le bois) ;
- Le platelage est constitué de sections boulonnées, formées d'extrusions (de 305 mm de large) soudées entre elles par FSW ;
- C'est le 2^{ème} pont autoroutier au Québec qui inclut de l'aluminium.

Diapositive 59

- On a vu que les propriétés mécaniques de l'aluminium sont moindres dans les zones affectées thermiquement lors du soudage MIG et TIG ;
- Cependant l'aluminium peut être soudé par friction malaxage un procédé qui assemble à l'état solide, communément appelé FSW (*Friction Stir Welding*) ; les pertes de propriétés seront moindres avec le FSW ;
- Voici une démonstration du FSW avec un outil de type double épaulement réalisé au centre de soudage de l'UQAC.

Diapositive 60

- Bien qu'il ne soit pas obligatoire, pour des raisons structurales, de protéger la surface des pièces d'aluminium, il est possible de faire des traitements de surface à l'aluminium pour des raisons d'esthétisme ou de fonctionnalité particulière ;
- L'anodisation est un procédé propre à l'aluminium ; il permet d'épaissir la couche d'oxyde naturellement présente ;
 - Choix de couleur limité possible, conserve l'aspect métallique ;
 - Permet d'augmenter la résistance à l'abrasion et la longévité du fini ;
- Il est bien sûr possible de peindre l'aluminium mais attention il faut réaliser une bonne préparation de surface ;
 - Choix du lustre ;
 - La peinture fournira une plus large protection contre la corrosion sous une plus large gamme de pH.
- 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 ;



ALU-COMPÉTENCES

- Une surface lisse, brillante ou mate, qui procure au produit une meilleure finition.

Diapositive 61

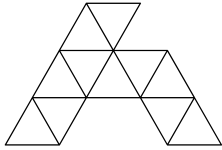
- La figure suivante illustre une courbe contrainte – déformation classique de l'aluminium ;
- On peut obtenir le module de Young de cette courbe ;
- Étant donné que la limite élastique n'est pas aussi franche que l'acier, à 0,2% de déformation ($\epsilon = 0,002$), on trace une ligne parallèle au module 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'aluminium suivi de la rupture ;
- Le point C délimite la zone de striction, diminution localisée de la section de l'éprouvette d'aluminium ;
- Le point D est le point de rupture ;
- On remarque que le module de Young de l'aluminium est 2,86 fois inférieur à celui de l'acier ($200\ 000 / 70\ 000 = 2,86$); cela affecte la rigidité de la structure ;
- Similairement, le module de cisaillement de l'aluminium est 2,96 fois inférieur à celui de l'acier ($77\ 000 / 26\ 000 = 2,96$); cela affecte la rigidité de la structure ;
- Cette perte de rigidité peut être compensée en augmentant :
 - En flexion : $I_{al} = 2,86 \times I_{acier} \Rightarrow H_{poutre_{al}} = 1,4 \times H_{poutre_{acier}}$;
 - En axial : $A_{al} = 2,86 \times A_{acier} \Rightarrow$ l'aluminium est moins compétitif pour des éléments en traction pure (exemple câble en tension) ;
 - En torsion : $J_{al} = 2,96 \times J_{acier} \Rightarrow A_{apparente_{al}} = 1.7 \times A_{apparente_{acier}}$

Diapositive 62

- Le coefficient de Poisson est de 0,33 versus 0,3 pour l'acier ;
- Le module de cisaillement de l'Al est 26 GPa.

Diapositive 63

- On trouve ici différentes propriétés physiques de l'aluminium en comparaison avec l'acier, l'acier inoxydable et le béton ;
- On note que l'aluminium est 2,9 x plus léger que l'acier ;
- Le point de fusion de l'aluminium est de 660°C comparativement à 1500°C ;



ALU-COMPÉTENCES

- L'aluminium se dilate/contracte 2 x plus que l'acier ; il faut avoir cela en tête pour le climat québécois car les structures pourront subir des écarts de 80-90°C ;
- L'aluminium est 5 x moins résistant 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 64

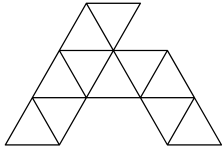
- Souvent on utilise la mesure de dureté comme mesure rapide de la résistance car elle a un lien direct avec la contrainte ultime F_u ;
- Mesurée à l'aide de l'essai Brinell, Rockwell ou Vickers ;
- Résilience
 - C'est une mesure de la ductilité ou de la capacité d'un matériau à résister aux chocs ;
 - Aussi une mesure de la fragilité du matériau à basse température ;
 - Mesurée à l'aide de l'essai Charpy ;
 - L'aluminium est très résilient (structure fcc) : 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 65

- 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 66

- 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 ($\Delta\sigma$) donnée.



ALU-COMPÉTENCES

On définit la différence des contraintes cycliques comme la **différence algébrique** entre la contrainte maximale (σ_{max}) et la contrainte minimale (σ_{min}).

Diapositive 67

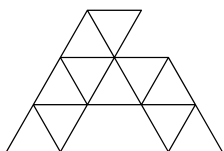
- Cette figure est une courbe (double logarithme) dite « S-N » ;
- Elle donne la relation entre le nombre de cycles avant la rupture en fatigue et l'écart de contrainte amenant la rupture ;
- Les normes de conception considéreront que cette courbe ne varie pas d'un alliage d'aluminium à l'autre ;
- Elle changera surtout en fonction de la catégorie de détail (soudé ou pas, direction de la soudure, continuité de la soudure etc) ;
- Pour donner une idée du nombre de cycles d'une structure, un pont situé sur une route très passante subira $1,1 \times 10^8$ cycles chargement sur 75 années de durée de vie.

Diapositive 68

- Les alliages d'aluminium peuvent tout de même se corroder ;
- 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 69

- Couche d'oxyde naturelle :
 - Rend l'aluminium 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 (taux de dissolution en forme de « U ») ;



ALU-COMPÉTENCES

- De la nature de l'alliage (séries 2xxx et 7xxx ne sont pas très bonnes).

Diapositive 70

- Il existe différentes formes de corrosion. Les plus communes sont la corrosion par piqûres, la corrosion caverneuse et la corrosion galvanique.
- La corrosion galvanique est la forme la plus préoccupante pour des assemblages contenant de l'aluminium. Les meilleures pratiques pour l'éviter consiste à minimiser le différentiel galvanique (acier galvanisé), couper le contact galvanique (peinture ou film isolant) ou éliminer la présence d'un électrolyte (égouttement).

Diapositive 71

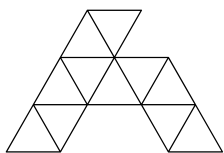
- Voici un exemple de corrosion feuilletante sur le pont d'Arvida ;
- Elle se produit, pour certains alliages (ex. 2xxx), sur des produits laminés ;
- Illustre les conséquences d'un choix non-optimal d'alliage pour un pont.

Diapositive 72

- On voit sur cette diapositive le résultat d'un test au brouillard salin d'un assemblage de brides de raccord en aluminium 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 73

- Contact avec le béton et autres matériaux de construction
 - Contacts avec béton (durci), bois, polymères ou plâtre (durci) : pas propice à la corrosion galvanique puisque ces matériaux ne sont pas des métaux ;
 - Contact avec le béton :
 - L'aluminium résiste très bien à la corrosion généralisée ;
 - Mais le béton non durci tachera permanentement le fini de surface de l'aluminium même s'il est anodisé ; des précautions doivent être prises pour éviter que le béton non durci éclabousse l'aluminium ;
 - Attention au contact avec le béton armé surtout si des chlorures sont présents pour accélérer son séchage :
 - Forte corrosion galvanique due à la présence de l'acier ;
 - L'aluminium doit être protégé/isolé avec une membrane polymère.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 74

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

Diapositive 75

- Nous débutons ici, une série d'exemples d'utilisation de l'aluminium dans les bâtiments et structures civiles ;
- 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 76

Parement (**mur ext**) (système de cassettes d'aluminium modulaires) :

- Panneau aluminium : plaque d'aluminium alliage haute-performance 5754-H42 aluminium-magnésium de 2 mm d'épaisseur ;
- Épaisseur des cassettes : 32 mm pour les parements Pm01/32 et Pm02, 64 mm pour le parement Pm01/64 ;
- Finition : fini Panfab D-MAX (tel que Duranar XL) par Otéfal, prépeint en usine avec revêtement PVDF avec résine KYNAR 500 70% et une couche de Claire PVDF avec résine KYNAR 500 70% sur les finis Métallisés ;
- Produit : parement modulaires # PZ-600 Panfab EZclips d'Industrie Panfab.

Parement **du dôme**: bardage d'aluminium;

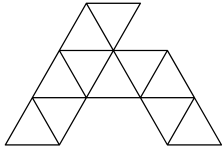
- Tôle d'aluminium : 1mm d'épaisseur ;
- Texture : fini stucco ;
- Fini : aluminium naturel ;

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 77

- Bâtiment emblématique de Montréal, la Place Ville-Marie a été inauguré en 1962 ;
- La tour a conservé un aspect résolument moderne grâce à son revêtement (en aluminium) ;



ALU-COMPÉTENCES

- Le revêtement extérieur à plus de 60 ans et a bien conservé son fini architectural.

Diapositive 78

- Une partie des estrades du stade de football de l'Université Laval est en aluminium.

Diapositive 79

Le premier pont routier en aluminium au monde a été construit à Arvida (ville de Saguenay)

- Conçu par SNC et Alcan (AtkinsRéalis et Rio Tinto maintenant ;
- Fabriqué par Dominion Bridge à Lachine (fermé) ;
- Construit en 1950 ;
- Alliage série 2xxx ; pas un bon choix en termes de corrosion et longévité ;
- Portée de l'arche 88 mètres ;
- Portée totale : 150 m ;
- Une réparation depuis 1950 : les zones corrodées en contact avec le béton ;
- Platelage en béton remplacé 3 x ;

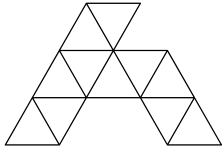
Diapositive 80

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. 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 en aluminium ;
- Alliage 2014-T6 fourni par Alcoa ;
- Aluminium : 53 000 livres (23,6t) ; acier: 128 000 livres (58,2 t) ;
- Aluminium : $H = 10'$ (3,04 m) ; acier: $H = 9'$ (2,74m) ;
- Charge de conception : Cooper E-60 (267,5 kN).

Diapositive 81

- Schwansbell Bridge Allemagne;
- Construit en 1955 ;



ALU-COMPÉTENCES

- 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 82

Voici deux passerelles piétonnières

Millenium Bridge London ;

Millenium Bridge Gateshead ;

- Légèreté de l'aluminium : ce pont se lève pour laisser passer les bateaux.

Diapositive 83

Passerelle de 44 mètres de longueur et 4,7 m. de large ;

- Masse 20 000 kg ;
- Installer en 6 heures.

Diapositive 84

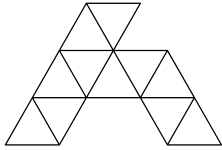
Passerelle Wellington, canal Lachine, Parcs Canada;

- Temps de fermeture de la piste cyclable : 3 semaines pour la démolition et la reconstruction.

Diapositive 85

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 couler 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 armé.



ALU-COMPÉTENCES

Diapositive 86

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

Diapositive 87

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

Diapositive 88

Œuvre d'art

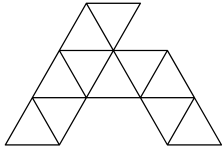
Les plaques sont des rayures fabriquées numériquement semblables, mais uniques qui se chevauchent à travers des languettes prolongées pour doubler l'épaisseur du matériau. Le chevauchement des languettes se densifie pour faciliter le transfert de charges supplémentaires et offre une meilleure connectivité. La porosité augmente avec la hauteur à mesure que les besoins structurels diminuent, permettant à plus de lumière de pénétrer dans l'espace. La densité des rivets est aussi optimisée selon besoins structureux.

Marc Fornes/The Very Many. (2014). VAULTED WILLOW. En ligne. Repéré à <<https://theverymany.com/public-art/11-edmonton/>>

Diapositive 89

Conclusions

- Léger, bonne résistance spécifique ;
- Le module de Young est le tiers de celui de l'acier, section plus grande ;
- Résistant à la corrosion atmosphérique mais attention à la corrosion galvanique ;
- Usage courant en construction : feuille série 5xxx et extrusion série 6xxx ;
- Coût d'acquisition plus élevé mais plus durable ;
- Durabilité sans entretien pour 75 ans diminuant le coût total de possession ;
- Recyclable et recyclé à l'infini ;



ALU-COMPÉTENCES

- Possibilité esthétique ;
- L'aluminium du Québec possède une empreinte carbone très faible ;
- Attention au soudage et à la fatigue.

Bonne conception de structure en aluminium!

Merci pour votre attention.

Diapositive 90

- Nos partenaires financiers présents au début du projet Alu-Compétence.

Diapositive 91

- Remorque en aluminium.

Diapositive 92

- Remorque en aluminium.

Diapositive 93

- Remorque en aluminium.

Diapositive 94

- Simulation de crash d'une glissière de sécurité attachée à un platelage de pont en aluminium.

Diapositive 95

- Roman de Jules Verne (1865) qui parle d'aluminium en se basant sur une « histoire » vraie de la production de l'aluminium en 1854.