Document de support de la présentation :

**Métallurgie des alliages d’aluminium**

Contenu développé par :

Guy Morin, ing.

# Introduction

Ce document est un complément d’information à la présentation : « Métallurgie des alliages d’aluminium » d’Alu-Compétences. Des informations sont ainsi fournies pour chaque diapositive de la présentation.

L’aluminium est le second métal utilisé dans le monde après l’acier en fabrication commerciale, avec environ 60 millions de tonnes produites en 2020. Cette production a connu une augmentation constante et soutenue depuis 1950, où elle était d’environ 1 million de tonnes. Le développement de la consommation et des applications de l’aluminium et de ses alliages peut être attribué à plusieurs de ses propriétés qui sont des critères décisifs dans le choix des métaux par les utilisateurs, comme la légèreté, la résistance, la conductivité thermique et électrique, et la résistance à la corrosion. Ces propriétés sont obtenues en tirant parti des phénomènes et réactions métallurgiques propres à l’aluminium et ses alliages.

Ce module de formation est fourni dans le cadre du projet Alu-Compétences d’AluQuébec, de la grappe aluminium du Québec, et de ses partenaires. Le projet Alu Compétences vise à produire et à diffuser des contenus techniques et scientifiques pour l’enseignement de l’aluminium aux niveaux collégial et universitaire, notamment pour les programmes de design industriel, d’architecture et de métallurgie, ainsi que pour les facultés de génie civil, mécanique et aérospatial. Alu-Compétences souhaite enrichir la formation des futurs professionnels sur les notions entourant l’aluminium. Il vise également à encourager les institutions d’enseignement à utiliser leur capacité d’adaptation des programmes de formation pour mieux répondre aux besoins des entreprises de l’industrie de l’aluminium en assurant un bassin de main-d’œuvre qualifiée.

Ce module de formation et la présentation qui lui est associée ont été préparés pour Alu Compétences par le Centre de Métallurgie du Québec. Depuis 1986, l’équipe du CMQ supporte par ses travaux les initiatives de R&D des entreprises québécoises et anime le secteur de la métallurgie par des formations sur mesure ou la tenue d’évènements avec divers partenaires.

Les partenaires du projet Alu-Compétences vous souhaitent une bonne lecture.

# Diapositive 5

L’aluminium est le métal commercial le plus léger. Son utilisation permet d’obtenir des propriétés mécaniques similaires à celles des aciers doux pour une masse du tiers, ce qui l’avantage dans les usages aéronautiques, des transports ou des loisirs. L’aluminium, ayant une rigidité du tiers de l’acier, demande une adaptation de forme ou d’épaisseurs pour atteindre une résistance équivalente à celle de l’acier. En conséquence, le gain réel de masse est d’environ 50 %. La conductivité de l’aluminium est de 63 % de celle du cuivre recuit IACS et il est un bon conducteur de chaleur. Sa résistance à la corrosion est bonne à excellente entre les pH 6 et 9. En ce qui concerne sa mise en forme, il est possible d’utiliser les mêmes procédés que ceux utilisés pour l’acier.

# Diapositive 6

L’aluminium se regroupe en utilisant la liaison métallique où les électrons sont libres de changer d’atome. Le lien est assuré tant que les atomes restent à proximité les uns des autres. Ce partage d’électron permet à chaque atome d’avoir une configuration stable de 8 électrons dans sa couche extérieure.

# Diapositive 7

Les électrons libres permettent le déplacement de proximité des atomes entre eux, ce qui explique la ductilité (malléabilité) des métaux. Le déplacement d’électrons est possible à partir d’une source de courant ; le métal agit comme un conducteur d’électrons libres. Si on excite localement par agitation thermique, la vague d’excitation peut se propager dans le métal, ce qui permet la conduction de chaleur.

# Diapositive 8

La forme cristalline caractérise les métaux à l’état solide, c.-à-d., les atomes se placent lors de la solidification dans un ordre défini et répété. Ici, le lingot s’est refroidi rapidement au bas d’un moule en cuivre. Ce gel rapide a conduit à la formation de cristaux équiaxes, qui peu à peu ont été remplacés par des cristaux orientés dans le sens de l’écoulement de la chaleur par empilement des atomes. Cette structure de coulée est indésirable pour la transformation mécanique, car le métal ne réagit pas de manière uniforme à la déformation. Nous verrons que le laminage à chaud permet une recristallisation continuelle pendant la déformation et l’obtention d’une structure uniforme à grains fins.

# Diapositive 9

La forme cristalline caractérise les métaux à l’état solide. Pour l’aluminium, la cristallisation se fait sous la forme cubique à faces centrées. Cette maille CFC élémentaire permet de reproduire en 3D un grain d’aluminium. On a 1/8 d’atome aux 8 coins et ½ atome aux 6 faces du cube. Cette forme cristalline reste inchangée pour l’aluminium après sa solidification.

# Diapositive 10

L’aluminium se solidifie sous la forme CFC et forme un grain. Lors de la solidification, ces grains se joignent entre eux et aux parois, les atomes se placent en situation énergétique la plus stable entre les 2 grains (joint de grains). Pour les alliages, les joints de grains contiennent en général plus d’éléments d’alliage. Le joint de grain étant souvent plus réactif en situation de corrosion, certains alliages d’aluminium souffrent de corrosion intergranulaire.

# Diapositive 11

Le lien métallique permet un déplacement local sans rupture, car il n’est pas orienté dans l’espace; seule la proximité des atomes doit être respectée. En théorie, une contrainte appliquée (effort) peut faire glisser des plans d’atomes denses les uns sur les autres.

# Diapositive 12

Dans la structure CFC, il existe des plans denses (ceux où tous les atomes se touchent) dans toutes les directions associées aux diagonales et coins du cube. Lors d’une déformation, tous les grains d’aluminium sont en théorie placés pour glisser dans la direction de la contrainte. L’aluminium est donc très ductile comme tous les métaux à structure CFC tels que le cuivre, le platine, le plomb et l’argent.

# Diapositive 13

En métallurgie, il existe des mécanismes de durcissement (augmentation des propriétés mécaniques). Ils utilisent tous le même principe : **empêcher le glissement atomique**. Ces principes ou méthodes sont : l’écrouissage, où l’on perturbe l’arrangement atomique local, l’ajout d’éléments chimiques dans le réseau cristallin, et la présence de cristaux étrangers formés par les éléments d’alliages entre eux ou avec l’aluminium.

# Diapositive 14

Un alliage est un mélange d’éléments chimiques où au moins un des éléments est un métal. Ces éléments d’alliages sont plus ou moins solubles dans l’aluminium solide. On nomme solution solide de substitution le remplacement d’un atome du réseau cristallin, ici l’aluminium, par un autre atome en alliage. La présence d’un environnement électronique étranger affecte localement le déplacement des atomes et augmente les propriétés mécaniques.

# Diapositive 15

L’aluminium n’a pas la même affinité avec tous les autres éléments chimiques, ce qui se traduit en des solubilités différentes d’un élément d’alliage à l’autre. Lorsque la limite de solubilité est atteinte, l’élément d’alliage n’entre plus dans le réseau CFC et forme divers cristaux habituellement durs qui augmentent encore plus les propriétés mécaniques de l’alliage.

# Diapositive 16

Les éléments d’alliage en excès se combinent seuls, entre eux, ou encore avec l’aluminium sous forme de précipités ou cristaux durcissants. Ici, on voit une croissance dendritique d’aluminium (similaire au frimas dans un coin de fenêtre en hiver) et le silicium en excès rejeté entre les cristaux. La figure (métallographie) pourrait s’apparenter à une colonie de chenilles tronquée baignant dans un mélange silicium aluminium. Notez que l’aluminium que l’on voit en blanc est en réalité une solution solide Al avec Mg, Fe et Si et qu’en plus il y a présence de micro-précipités de Mg2Si de dimensions contrôlées par traitement thermique qui ont un effet notable d’augmentation des propriétés mécaniques.

# Diapositive 17

En métallurgie, on utilise le terme phase pour décrire une zone de la matière ayant une composition chimique et un type de réseau cristallin défini. Ces phases n’ont pas obligatoirement des liaisons métalliques. Pour les alliages d’aluminium, ces phases sont en général durcissantes : c. à d. qu’elles augmentent la résistance mécanique et abaissent la ductilité.

Les alliages commerciaux sont ceux qui offrent le meilleur compromis entre des 2 propriétés une fois les considérations de mise en forme rencontrées (par exemple, obtenir une résistance mécanique à chaud lors du laminage ou une fluidité à l’état liquide en fonderie).

# Diapositive 18

Des plans atomiques supplémentaires en insertion ou une cristallisation en hélice sous forme de vis se forment naturellement lors de la solidification. La zone de fin de ce plan dans le réseau cristallin représente un défaut linéaire appelé ligne de dislocation.

# Diapositive 19

La déformation se produit par glissement dans les plans denses et dans les directions denses, mais se produit par déplacement des lignes de dislocation. Le mécanisme se présente un peu comme un déchirement sans rupture, car les liens métalliques assurent la cohésion locale. Il implique localement 3 atomes (A vs B et C), le lien AB passant d’un atome vers le lien AC. On fait souvent l’analogie du déplacement d’un lourd tapis par deux personnes qui ont créé une bosse puis l’ont poussée vers l’autre bout au lieu de tirer tout le tapis.

# Diapositive 20

La déformation à froid, appelée écrouissage, cause des déplacements et un bris dans l’ordre du réseau CFC. Il y a multiplication de la densité de dislocations qui finissent par se nuire mutuellement et se regroupent en cellules. Les propriétés mécaniques augmentent, ce qui permet d’offrir une gamme de propriétés mécaniques pour les produits plats ou étirés.

# Diapositive 21

La formation des cellules de dislocation cause une augmentation de la résistance mécanique, ce qui limite la capacité de déformation ultérieure du métal soit par manque de capacité machine ou encore la fissuration du métal. L’empilement de lignes de dislocation augmente localement la distance entre les atomes et finit par éliminer le lien métallique (microfissures).

La déformation à froid peut être éliminée par un recuit de recristallisation à environ 300 °C qui permet d’abaisser les propriétés mécaniques en vue de poursuivre la déformation. Le désordre et l’énergie accumulée permettent la réorganisation des atomes en une structure CFC plus stable.

# Diapositive 22

Au niveau macroscopique, les grains les mieux orientés par rapport à la contrainte s’allongent, ce qui fait tourner les autres grains en position favorable, entraînant ainsi une structure allongée dans le sens de la déformation. Pour cette raison, on recherche une structure de grain équiaxe (i.e. uniforme dans toutes les directions) comme celle de gauche et fine qui est obtenue lors des étapes de mise en forme à chaud.

# Diapositive 23

Lors du réchauffage d’une structure écrouie à 225 °C le grain reste allongé, mais la densité de dislocation s’abaisse; on parle de restauration. Vers 325 °C, les grains recristallisent complètement et l’écrouissage est perdu. Cela peut être bénéfique pour pouvoir poursuivre la déformation, ou néfaste, notamment en soudage, où il faut prévoir la perte de propriétés mécaniques. Cette recristallisation débute aux points triples (intersection de 3 grains allongés) où il y a du désordre maximum dans le réseau.

Au-delà de 350 °C, la recristallisation est dynamique. Il n’y a pas d’écrouissage ; nous sommes dans le domaine du travail à chaud.

# Diapositive 25

Les alliages destinés au travail mécanique à froid sont dits de corroyage. En utilisant les mécanismes de durcissement par écrouissage(présence de secondes phases et solution solide), on obtient une gamme variée de propriétés mécaniques pour divers usages. Ils sont habituellement faiblement dosés en éléments d’alliage pour permettre leur mise en forme par déformation. Ici, le laminage sur un laminoir expérimental est montré.

# Diapositive 26

Les alliages d’aluminium corroyés sont désignés par 4 chiffres, dont le premier indique la famille principale. Ce système établi en 1954 est encore utilisé. On y adjoint une lettre et des chiffres représentant son état métallurgique (ses propriétés mécaniques).

# Diapositive 27

Pour la série 1XXX, les deux derniers chiffres désignent la pureté. Par exemple : AA1150 contient 99,50 % Al min. Le second sert à indiquer le nombre d’impuretés contrôlées par un maximum ou un minimum. Ici, pour les conducteurs électriques, un de ces éléments est le bore (max 0,05 %), car il abaisse beaucoup la conductivité électrique. Pour les autres séries 2XXX à 9XXX, les deux derniers chiffres indiquent le numéro de l’alliage et le second chiffre une modification ultérieure de cet alliage par exemple : le 6063 est l’alliage original et le 6363 un alliage modifié.

# Diapositive 28

Les alliages des séries 1000, 3000, et 5000 ne peuvent se durcir que par écrouissage ; ils ne répondent pas au traitement thermique de durcissement structural qui permet de faire apparaître des microcristaux durcissants (diapo à venir 42). Les alliages 1000 ont les propriétés mécaniques les plus faibles, mais ont une excellente ductilité, permettant d’obtenir des produits minces. Leur résistance à la corrosion permet l’usage alimentaire.

# Diapositive 29

L’alliage 1350 de la série 1000 est un très bon conducteur d’électricité. Sa faible densité combinée à sa bonne conductivité électrique lui permet son usage pour les câbles conducteurs aériens. Un ou des fils en acier ou en aluminium 6081 toronnés sont utilisés au centre des câbles pour les plus gros conducteurs. Le fil électrique d’usage domestique a été retiré quelques années après son implantation à la suite de quelques incendies. Pour éviter la formation d’alumine non conductrice et l’échauffement des connexions, on doit utiliser un fondant (flux) en pâte et effectuer des connexions serrées. Le co-laminage des alliages 1000 avec une âme en alliage de la série 2000 permet d’obtenir une tôle résistante mécaniquement et compenser la résistance médiocre à la corrosion des alliages 2000 (Alclad).

Diapositive 30

Les alliages de la série 3000 sont en fait une solution solide d’aluminium avec manganèse laminée à max 1,8 % Mn. On obtient une bonne ductilité et une bonne réponse à l’écrouissage. Ils sont utilisés pour de grandes déformations : canette d’aluminium, chaudronnerie, produit résidentiels. Les fabricants de gouttières effectuent la mise en forme finale directement de leur camion d’installation à partir de rouleaux de 3003 peints. Les alliages 3000, bien que plus résistants mécaniquement que ceux de la série 1000, ne permettent pas les applications structurelles. Cette série a été peu développée si on se réfère aux deux derniers chiffres.

Diapositive 31

Les alliages de la série 5000 au magnésium sont ceux utilisés pour les applications structurelles commerciales lorsqu’on recherche un produit plat. Il existe une gamme d’alliages variée allant de 2,5 à 4,6 % de magnésium. La ductilité de ces alliages est plus faible; il faut donc consulter les feuilles de spécifications pour connaître le rayon de courbure possible pour chaque alliage en fonction de leur état H de laminage. Ces alliages sont toujours fournis à un état H3X (diapo 36) restauré au four, car ils perdent leurs propriétés mécaniques après laminage par précipitation (apparition de cristaux de Mg2Al3 aux joints de grains à température ambiante).

Diapositive 32

Les alliages de la série 5000 se soudent très bien, résistent à la corrosion atmosphérique et marine, et répondent bien à l’anodisation (diapo 94-100). Les alliages les plus résistants à fort dosage en magnésium peuvent souffrir de problèmes de corrosion intergranulaire ou effeuillante en atmosphère maritime. Il faut demander des grades maritimes où la chimie a été adaptée pour limiter ce problème.

En fabrication commerciale mécanosoudée, les produits plats en alliage 5XXX sont combinés avec des extrusions en alliage 6XXX.

Diapositive 34

L’écrouissage engendre des perturbations dans le réseau cristallin CFC de l’aluminium appelés dislocations (diapo 20). Après l’écrouissage, la limite élastique et la résistance du matériau sont augmentées et la résistance à la rupture est diminuée. Lors d’un essai de traction, on divise la force en N mesurée par la cellule de force de la machine par la surface de l’échantillon mesurée avant l’essai pour obtenir une valeur standardisée qu’on appelle contrainte. On mesure aussi la longueur finale et on calcule l’allongement à la rupture avec l’équation (lf-li)/li X 100.

Limite élastique : contrainte où la déformation permanente (plastique) commence, par convention à 0,02 % de déformation de l’extensomètre (jauge placée sur l’éprouvette enlevée après le 0,02 %). Avant cette limite, le métal se revient à sa longueur initiale si on retire la contrainte

Résistance mécanique : contrainte à la rupture.

Module de Young : pente de la portion élastique de la courbe, elle st le 1/3 de celle de l’acier et ne se change pas ni par alliage ni par traitement thermique. Il faut adapter la forme ou augmenter les épaisseurs pour obtenir la rigidité requise.

Diapositive 35

Le taux de déformation (ou d’écrouissage) effectué sur un métal recuit définit exactement les propriétés mécaniques obtenues. Les graphiques montrés indiquent les limites élastiques et allongements possibles selon la déformation effectuée à partir du recuit pour les alliages commerciaux 1100, 3003, 5052 les plus utilisés. On retrouve ces données dans les feuilles de spécifications techniques de ces alliages. Pour obtenir les propriétés mécaniques correspondant à 50 % de déformation sur une tôle de 2 mm, on doit laminer une tôle de 4 mm recuite (c.-à-d. un rouleau refroidi sortant d’un four à 350 °C). Avant cette opération de recuit, on a en général un autre laminage qui part de l’épaisseur de tôle reçue en usine (qui est à l’état recuite ou laminée à chaud) pour obtenir le 4 mm. Pour satisfaire un client désirant 2 mm du même lot reçu, qui veut par exemple plier la tôle chez lui, le laminoir devra faire une plus grosse première passe, par exemple jusqu’à 3,5 mm, puis recuire la tôle, ce qui laisse une passe plus légère de laminage en finale pour obtenir le 2 mm demandé moins dur.

Diapositives 36 et 37

Les états laminés sont identifiés d’une lettre H et un chiffre 1 à 3 suivi de second chiffre de 1 à 9 selon l’écrouissage fait à la dernière passe. L’état H1X est l’état laminé de base. Parfois, on livre à l’état restauré H2X, c.a.d. après un recuit partiel 225 °C, pour obtenir des propriétés similaires à H1X, parce que le ratio allongement/limite élastique est meilleur que pour cet alliageà l’état H2X. Pour l’alliage 5000, cet état restauré est requis pour stabiliser les propriétés mécaniques et on le désigne H3X (diapo 31).

Si on désire une tôle de 3003 à l’état recuit, on commandera du 3003 O. Pour certains produits de tôles étirées ou embossées, on utilise un troisième chiffre.

Diapositive 38

Lors du recuit de recristallisation, de nouveaux grains se forment dans la structure écrouie. Ces grains ont une densité de dislocation faible et une ductilité maximale. La recristallisation se fait par un mécanisme de diffusion local (déplacement d’atomes en positions CFC stables). La diffusion (mouvement des atomes) est plus rapide à haute température, donc les propriétés finales dépendront du temps, mais surtout de la température. Par exemple, pour l’alliage 1100 H18 laminé fortement, le retour à une limite élastique de 80 MPa demande 8 h à 260 °C, 1 heure à 277 °C, mais seulement 5 minutes à 320 °C. Il faut en tenir compte lors du soudage.

Diapositives 39 et 40

 Certains alliages, notamment le 3003, présentent un fort grossissement du grain si le taux d’écrouissage est faible (autour de 8 à 10 %). On doit les recuire sur la ligne de laminage et non en four (en rouleaux). En soudage, cela peut aussi poser des problèmes si le métal a été écroui avant. Notez qu’en bas d’un certain taux d’écrouissage en bas du seuil critique, il n’y a pas assez d’énergie emmagasinée pour produire la recristallisation.

Diapositive 42

Le durcissement structural utilise à bon escient la solubilité partielle des éléments d’alliage à température ambiante. Les alliages qui répondent bien à ce traitement forment des microcristaux durcissants dans le réseau CFC de la solution solide d’aluminium. Il se fait en 3 étapes. Notez que certains alliages d’aluminium comme ceux de la série 5000 présentent une courbe similaire, mais que la précipitation obtenue n’est pas durcissante.

Diapositive 43

Étape 1 : mise en solution qui sert à éliminer les cristaux formés lors du refroidissement lent qui ne donnent pas le durcissement optimal (juste la présence d’une seconde phase dans une solution solide un peu comme pour les alliages non durcissants par traitement thermique des séries 3000 et 5000).

Étape 2 : trempe ou refroidissement rapide pour conserver le maximum des éléments d’alliage en solution et empêcher la réapparition des cristaux non durcissants. Certains alliages à précipitation lente n’ont pas besoin d’une trempe à eau.

Étape 3 : vieillissement pour faire réapparaître par précipitation les microcristaux durcissants. La limite élastique augmente par un facteur de 2 à 4. Il se fait soit à température ambiante T4 (environ 20 jours) ou accélérée au four T6 (8 à15 heures). Certains alliages ont une vitesse de précipitation trop lente à température ambiante ; un T4 demanderait des mois, sinon des années et aboutirait en un alliage aux propriétés mécaniques instables entre temps.

Diapositive 44

La trempe ne change pas la structure de l’aluminium. Elle reste CFC. Le métal ne réagit pas comme l’acier ; la dureté après trempe reste à peu près la même que celle d’origine.

Lors de la précipitation T4 ou T6, les éléments d’alliage en qui deviennent en sursaturation se recombinent entre eux (par diffusion locale) pour former des précipités qu’on dit cohérents avec le réseau cristallin tout autour. En cas de contrainte appliquée, cette cohérence nuit grandement aux mouvements des atomes lors des déformations d’où une limite élastique augmentée (diapos 16 à 19). Ce phénomène est activé thermiquement (diffusion) et si on chauffe trop haut ou trop longtemps on revient à la formation de cristaux non cohérents qui n’affectent plus autant le réseau. On a un durcissement qui ressemble à celui des séries 3000 et 5000.

Diapositive 45

Le vieillissement au four du 6061 permet d’augmenter les propriétés mécaniques par précipitation cohérente. Les hautes températures favorisent la diffusion atomique rapide, mais on n’obtient pas des propriétés optimales. On perd celles-ci lorsqu’on dépasse le temps du sommet de la courbe. Notez que l’échelle logarithmique de l’abscisse est en heures. À 177 °C, on obtient un traitement économique en durée pour une valeur intéressante de la résistance mécanique et on obtient une stabilité en cas de variation de temps de traitement (fenêtre de procédé). En soudage, on obtient une perte rapide de l’état T6 en dedans de quelques secondes, car on dépasse largement 260 °C autour de la soudure. On y reviendra (diapo 88 et 89).

Diapositives 46 et 47

Les états traités thermiquement sont désignés par une lettre T et un nombre. Les états T indiqués ne sont pas tous offerts pour tous les alliages. On a des états T pour les alliages dont la précipitation à température ambiante est assez rapide pour permettre un refroidissement naturel (T1, T2, T3 et T4) vs (T5 à T10) qui doivent être vieillis au four. On a aussi l’effet de la précipitation à haute température. Si elle est trop rapide et néfaste, on doit tremper rapidement (états T3, T4, T6 à T9). Dans les autres cas, un refroidissement sans trempe est suffisant (T1, T2, T5 et10). On a donc 4 cas de base possibles au départ selon la vitesse de précipitation à haute température et celle à température ambiante.

On ajoute le T7, sur vieillissement où on dépasse le maximum de la courbe de la diapo 45 pour certains alliages sujets à la corrosion intergranulaire sous contrainte (ex. : l’alliage de fonderie 201). On ajoute le T5 pour certains alliages ou procédés de fonderie où la trempe cause trop de déformations sur les pièces. Pour des produits plats sujets à distorsions à la trempe pouvant vieillir naturellement, cela correspond au T1 ou au T10 pour le vieillissement au four.

Pour plusieurs traitements dédiés au laminage, il est préférable d’effectuer du travail à froid avant T2 ou T8 ou après le vieillissement final T9 selon l’alliage. Notez que, pour les plaques en 6060 T6, l’écrouissage est perdu lors de la mise en solution, la résistance mécanique ne proviendra donc que de la précipitation.

Diapositives 48 et 49

Les alliages de la série 2000 sont ceux pour qui le phénomène de durcissement structural a été découvert en 1908 (Duralumin). On a découvert que des échantillons de traction sur des éprouvettes fraichement trempées donnaient de meilleures limites élastiques avec le temps. Les alliages de la série 2000 offrent d’excellentes propriétés mécaniques, mais sont chers de mise en œuvre (coulée, laminage) et n’ont pas une bonne tenue à la corrosion à cause de la présence de précipités riches en cuivre, un métal noble qui favorise la corrosion de l’aluminium. Pour contrer la faible résistance à la corrosion, on recouvre d’alliage 1100 en surface (Alclad) par laminage à chaud 2 ou 3 lingots le 2000 étant au centre. Mises à part les tôles pour le marché aéronautique, on en fait des forgeages et des rivets. Ces alliages sont produits aux États-Unis, car ce sont des alliages stratégiques. Ils sont peu utilisés en fabrication commerciale (tôles 5000 et extrusions en 6000).

Cas des rivets en 2017 : On garde ceux-ci après mise en solution dans l’azote liquide. Une fois à température ambiante, la ductilité permet leur pose sans rupture. Après 28 jours de vieillissement naturel, on obtient des rivets avec les propriétés maximales.

Diapositive 50

La série 6000 sert presque exclusivement au marché des profilés fabriqués par le procédé de filage (extrusion en anglais diapo 60). Grâce au silicium, ces alliages peuvent être mis en forme à l’état semi pâteux au travers de matrices d’extrusion. Les alliages contiennent aussi du magnésium pour former une précipitation durcissante de Mg2Si. Le silicium, qui abaisse le point de fusion, aide à refermer les écoulements de métal séparés dans la matrice d’extrusion pour les profilés creux. Il aide aussi à la soudabilité en fabrication mécanosoudée.

Diapositive 51

Le procédé d’extrusion permet d’obtenir des formes en 3D linéaires. Les détails fonctionnels (conduits, passe fil, crochets) peuvent être intégrés à la fonction structurelle comme montré à la figure de droite. Les extrusions coupées ont une précision dimensionnelle suffisante pour aussi servir à des formes 3D simples comme pour des boîtiers ou des angles. On économise les frais d’usinage et la matière.

Diapositive 52 et 53

Les principaux alliages de la série 6000 sont le 6061, pour des usages structurels comme un poteau de lampadaire, et le 6063, pour les extrusions de forme complexe. L’alliage 6005 offert à l’état T5 offre un compromis économique lorsque la complexité de la forme n’est pas trop grande. On achète les profilés en pieds linéaires, soit des profilés standards offerts par l’extrudeur ou encore avec une matrice sur demande qui n’est pas très dispendieuse par rapport à une matrice de forge ou de fonderie.

Diapositive 54

Les alliages 7000 contiennent du zinc qui se combine avec les autres éléments d’alliage pour obtenir une précipitation beaucoup plus durcissante que pour la série 6000. Ce sont des alliages stratégiques plus chers, car plus difficiles à mettre en forme. Cependant, l’alliage 7005 est offert pour le secteur commercial et est utilisé pour alléger les articles de sport. Un vélo bas de gamme en aluminium sera fait de 6061, et un vélo haut de gamme en 7005. L’alliage 7005 contient du zinc et doit être peint pour résister à la corrosion. Ces alliages sont aussi offerts en plaques ou en forgeages et sont avec les alliages 2000 destinés au marché aéronautique ou transport terrestre.

Diapositive 55

Les alliages 8000 comprennent ceux qui ne sont pas couverts par les autres séries. Récemment, on compte parmi ces alliages ceux avec lithium (densité 0,5 g/cm3) qui permettent des alliages d’aluminium de densité 2,5 g/cm3 utilisés en aéronautique.

Diapositive 56

Les alliages 4000 ont peu d’usages comme produits finis et sont donc discutés en fin de liste. Ils contiennent du silicium à fort dosage : autour de 5 à 12 %. À 12 %, la température de fusion finale de ces alliages (phases se solidifiant en dernier) est de 577 °C. Les usages sont les produits de métal d’apport pour le soudage pour obtenir des joints résistants.

Il y a possibilité de durcissement structural. Notez que les joints soudés en alliages 4000 sortent grisâtres après l’anodisation et pour cette raison on utilise souvent un alliage 5000 comme métal d’apport. Pour les radiateurs d’automobiles, on utilise une tôle mince co-laminée de 3003 avec 4343. Un chauffage entre 577 et 650 °C permet de rendre le 4343 pâteux et réaliser le brasage (soudure) entre les lames ondulées de la tôle.

Diapositive 58

Les alliages 5000 disponibles en tôles à divers niveaux d’écrouissage et les profilés de la série 6000 T6 ou T5 sont utilisés pour la fabrication mécanosoudée commerciale dans les PME.

Diapositive 59

Le laminage sert à amincir des produits plats pour obtenir des tôles ou des feuilles minces. Il est principalement utilisé pour les séries 1000, 3000 et 5000 pour donner divers taux d’écrouissage à froid en final. On part soit de gros lingots rectangulaires qui sont écroutés en surface avant le laminage à chaud, ou encore on coule en continu une ébauche mince qui est laminée à chaud à même la ligne de coulée.

Diapositive 60

Le filage est le procédé de transformation des alliages 6000 et certains alliages 7000. Une billette, coupée d’un long lingot rond, est chauffée dans un four tunnel à 450 °C qui rend le métal très ductile. La billette est chargée dans une presse qui la pousse contre une ou des séries de matrices. La matrice est une rondelle faite en acier outil H3 avec une découpe de la forme désirée. La surface de la découpe est nitrurée pour augmenter la durée de vie de la matrice. Pour faire un profilé creux, deux matrices sont nécessaires : une qui coupe le flot de métal et une avec une découpe de même forme, mais plus petite pour forcer le métal à se ressouder. La présence de silicium et de composés à bas points de fusion aide au resoudage des flots de métal.

Diapositive 61

Le filage étant fait à chaud, il n’y a pas d’écrouissage, les alliages sont donc dosés pour durcir par durcissement structural avec une précipitation pas trop rapide à haute température pour permettre un refroidissement à air forcé. Le coût sera calculé en fonction de la résistance de l’alliage et la grosseur de la billette dictée par le cercle utilisable de la billette. Il est important que les épaisseurs soient le plus uniformes possible pour permettre un écoulement uniforme. On balance donc la matrice dans le cas d’extrusion à cavités multiples.

Diapositive 62

Les assemblages en alliages 6000 sont souvent anodisés pour en améliorer la résistance à la corrosion. Il faudra utiliser un alliage d’apport de soudage en 5356 si on désire une correspondance de couleur ou en 4343 si on désire plus de résistance mécanique. Des trous de drainage sont requis pour vider les profilés creux et empêcher le flottage dans les bains d’anodisation. Si on désire usiner la surface, il faut vérifier auprès de l’extrudeur que le grain est propice à l’anodisation. Ici, une structure de grain indésirable est présente vis-à-vis la profondeur d’usinage, ce qui a résulté en un fini tacheté après l’anodisation. La vitesse d’extrusion a été abaissée chez l’extrudeur pour éliminer cette structure de grain grossier.

Diapositive 63

Le principal avantage du filage est l’obtention d’une forme près des cotes finales avec une grande productivité et l’ajout de détails fonctionnels à l’usage fonctionnel (diapo 50-51).

Diapositive 64

Le tréfilage permet de produire du fil par une diminution de section en passant ce fil dans une filière conique. La tréfileuse contient un train de filières avec des cabestans après chaque filière qui tirent le fil au travers de la filière. Un recuit sera nécessaire lorsque le taux d’écrouissage maximum est atteint. Les réductions de section pour obtenir un taux d’écrouissage précis sont calculées à partir de la fin comme vu à la diapo 35. Une série de bobines de fil de même diamètre peuvent alimenter une toronneuse pour fabriquer les câbles. On utilise, comme départ, une ébauche de 1 cm de diamètre obtenue après coulée et laminage à chaud en coulée continue.

Diapositive 65

Le cintrage permet de produire des formes complexes 3D à partir de profilés droits. Lors du pliage, la surface extérieure (extrados) est étirée et celle qui est intérieure (intrados) est comprimée. Il y a donc une déformation qui fait partie de la forme finale. Pour éviter ces déformations, le profilé peut être étiré en même temps que la déformation. Pour réaliser certaines formes complexes, on remplit parfois le profilé de sable.

Diapositive 66

Le pliage de feuilles est un procédé de transformation aussi utilisé dans les ateliers. La grande ductilité de l’aluminium rend le pliage facile. Le module de Young (la rigidité plus faible diapo 34) augmente le retour élastique ; il faut donc en tenir compte dans la conception des angles d’outils ou les programmes de pliages machine. On utilise couramment des feuilles de polymère pour protéger les surfaces.

Diapositive 68

Le rayon de courbure est un bon indicateur de la ductilité de l’alliage pour prévoir la capacité de pliage en production sans fissuration. Vous pouvez faire le lien avec les diapos 35 à 37. Le % d’allongement est indiqué dans la colonne de droite.

Diapositive 69

Le forgeage permet la mise en forme dans des matrices. Pour l’aluminium, on utilise surtout les matrices fermées. La grande ductilité de l’aluminium permet aussi la forge à froid de petites pièces ce qui crée des textures de grain qui suivent la déformation.

Diapositive 70

L’emboutissage est fait avec une vitesse de déformation plus lente que le forgeage, ce qui permet un étirement du métal. On utilise des flans (tôles) minces qui sont comprimés entre 2 matrices. Le flan peut être retenu par la matrice ou libre de se déplacer dans la matrice. La matrice contient un espace pour amasser la partie déformée qui est coupée ou repliée selon le cas. Les alliages des séries 1000 et 3000 sont les plus utilisés pour ce procédé.

Diapositive 71

Un cas particulier d’emboutissage utilise une pression hydraulique pour comprimer un tube contre une matrice ou encore contenir l’intérieur d’un tube lors du pressage d’une matrice. Ce procédé est utilisé pour former des pièces de structure pour l’industrie automobile.

Diapositive 72

Un autre cas particulier est le repoussage rotatif où un flan circulaire est poussé contre une forme en rotation.

Diapositive 74

La mise en forme par fonderie à partir du métal liquide coulé dans un moule est une méthode économique pour produire une pièce près de cotes. Comme l’écrouissage n’est pas praticable sur une pièce de forme finale, on utilise des alliages plus dosés en éléments d’alliage qui forment de secondes phases dans la structure. Dans le cas du A356 à 7 % Silicium, qui est l’alliage le plus courant en fonderie de sable ou moule permanent, le traitement thermique de durcissement structural (mise en solution, trempe et vieillissement) est possible.

Diapositive 75

La plupart des alliages de fonderie contiennent du silicium qui a un effet fondant sur l’aluminium. En effet, l’ajout de 11,7 % de Si abaisse le point de fusion à 577 °C. Un alliage comme le 356 à 7 % Si passe par une zone pâteuse entre 617 et 577 °C, ce qui permet de refermer les fissures sans trop créer de tension dans le métal déjà solidifié et qui permet encore de faire passer les atomes liquides entre les parties solides. Le diagramme d’équilibre montré s’applique aux refroidissements lents des divers alliages Al-Si. Pour le 356, on ajoute aussi du magnésium pour former du Mg2Si durcissant par durcissement à l’état T6.

Diapositive 76

La désignation des alliages de fonderie utilise 3 chiffres. Le premier chiffre reprend en partie la désignation à 4 chiffres des alliages corroyés, mais puisqu’aucun alliage n’utilise le manganèse comme élément principal et que le silicium est largement utilisé, les alliages avec silicium ont été répartis entre les séries 300 et 400.

Diapositive 77

En moulage au sable à vert, le sable est lié avec de l’argile et de l’eau. Ce procédé est utilisé pour de petites séries ou des pièces nécessitant une moins grande précision et qualité métallurgique. En moulage à prise chimique où le sable est lié par une résine durcie par catalyseur, on obtient une meilleure précision et qualité métallurgique avec moins de sable entraîné. En moulage en cire perdue, les modèles en cire sont enrobés dans des coulis réfractaires et saupoudrés de réfractaires en couche successives. Une fois décirée, la carapace est cuite au four et préchauffée pour la coulée. On obtient des meilleurs finis de surface et précision dimensionnelle que pour le moulage au sable et il est possible de couler 1 à 2 mm sur de courtes distances.

Diapositive 78

Lorsque les quantités à produire justifient le prix d’un outillage, on passe au moule métallique qui offre de meilleures propriétés mécaniques dues au refroidissement rapide et à une absence d’inclusion de sable dans les pièces. On a le moule permanent ou coquille où le métal est coulé par basculement du moule. Après la solidification et un temps nécessaire à la prise des propriétés mécaniques, le moule est ouvert et les pièces sont éjectées. Le moule est recouvert d’un enduit réfractaire, ce qui affecte un peu le fini de surface, mais qui reste meilleur que pour le moulage au sable. L’autre procédé est le moulage sous pression (die casting), où le métal est injecté avec une forte vitesse et pression dans un moule. Le moule est équipé d’un système de refroidissement et l’empreinte est refroidie avec un liquide lubrifiant aspergé après lÉjection de la pièce et le retrait de la pièce du moule. Ce procédé offre les cadences de production les plus élevées et est apte à fournir le marché automobile. Il produit des pièces lisses puisque l’enduit lubrifiant n’est pas poudreux comme en moule permanent. Le moulage sous pression produit habituellement des pièces minces de 3 à 6 mm à parois uniformes plus minces qu’en moule permanent et avec beaucoup de nervures.

Diapositive 79

On utilise habituellement les lettres S, P et D pour distinguer les propriétés mécaniques selon le procédé de fonderie. Certains alliages sont exclusifs au procédé de moulage sous pression et d’autres au sable. Le tableau montre les propriétés mécaniques pour l’alliage le plus commun en fonderie commerciale le A356 et les 356. Le A356 contient une teneur maximum de 0,2 % de Fer dans la pièce moulée, car le fer forme des cristaux acérés dans la structure qui affectent l’allongement à la rupture. Le A356 est plus rarement coulé en moulage sous pression, car la faible teneur en fer favorise l’attaque du moule par l’aluminium liquide.

Diapositive 80

L’alliage 356 sera coulé en sable, car la présence d’inclusions de sable dans le moulage affecte la ductilité. Le A356 sera coulé en moulage par cire perdue ou en moule permanent pour obtenir un meilleur allongement; il répond au traitement thermique. En moulage sous pression, on utilise historiquement des alliages très chargés en zinc-cuivre et en fer provenant du recyclage d’aluminium, car le procédé de moulage rapide entraîne de l’air et affecte l’allongement, peu importe la présence de fer. L’air entraîné dans la pièce gonfle lors de la mise en solution et forme des pustules sur les pièces ce qui limite ou empêche les traitements thermiques. On arrive à mouler l’A356 en utilisant le moulage sous pression sous vide et il est possible de faire des traitements thermiques, cependant la faible teneur en fer de l’alliage liquide limite la vie du moule.

Diapositive 81

Le secteur automobile, désirant alléger les véhicules, s’intéresse beaucoup au moulage sous pression de pièces structurales, car ce procédé offre la productivité requise pour ce marché. Depuis 25 ans, il y a un grand effort de développement d’alliages dédiés à ce marché. Les alliages ont des noms commerciaux et leur développement est fait conjointement entre les producteurs d’aluminium et les fabricants automobiles et ils sont brevetés. En général, mis à part le silicium qui assure des propriétés mécaniques de base et une bonne fluidité à chaud, on limite la teneur en fer au minimum pour éviter la formation de cristaux acérés et ainsi maintenir 10 % d’allongement à la rupture, et on ajoute des éléments qui permettent le traitement thermique comme le magnésium. L’attaque du moule due aux basses teneurs en fer est mitigée par l’ajout d’un peu de manganèse. Ces alliages sont moulés sous vide partiel de l’empreinte pour éviter la formation de bulle d’air.

Diapositive 83

Les alliages d’aluminium ont une bonne soudabilité, du moins ceux utilisés ou dédiés aux applications mécanosoudées. L’aluminium a des caractéristiques différentes de l’acier à prendre en considération :

Présence d’une couche d’oxyde réfractaire et non-conductrice de courant qui doit être enlevée (éclatée) dans le cycle de soudage. Forte conductivité thermique, qui demande un chauffage rapide et un point de fusion bas qui demande de limiter de chaleur. L’aluminium s’oxyde facilement, un gaz de protection d’argon est nécessaire. Le bain de fusion est propice à capter de l’hydrogène atomique si la zone à souder est souillée ou humide.

Diapositive 84

Le soudage Gaz Metal Arc Welding (anciennement nommé MIG) ou Gaz tunsgten Arc Welding (anciennement nommé TIG) sont les deux procédés de soudage les plus répandus. La soudure GMAW est plus large et est dédiée aux assemblages plus sollicités. Le GTAW est plus adapté aux soudures esthétiques, mais a une résistance équivalente au GMAW si on tient compte de la grosseur du cordon.

Diapositive 85

En soudage GMAW, on utilise un fil d’apport par lequel l’arc électrique est établi, ce qui permet un taux de déposition élevée pour de grosses soudures. Le fil étant sujet à se contaminer et étant plus mou que l’acier, on utilise une gaine protectrice et 2 moteurs d’entraînement. Le gaz de protection est de l’argon ou un mélange argon-hélium pour plus de chaleur et de pénétration.

Diapositive 86

En soudage GTAW, l’arc est établi entre une électrode de tungstène et le joint d’aluminium. Le soudeur manipule une tige de métal d’apport dans l’arc pour fondre le métal de la tige. On obtient un joint plus mince.

Diapositive 87

Pour le soudage GMAW, on utilise la polarité inverse (i. e électrode positive) afin de briser la couche d’oxyde et l’éloigner du bain de fusion. En mode positif, la chaleur ne va pas bien à la pièce, on doit donc augmenter l’intensité du courant. Pour ne pas défoncer, on pulse le courant on/off afin de minimiser l’échauffement et le défoncement du joint. Les sources modernes permettent de multiples variations de type de pulsation d’onde.

En soudage GTAW, on utilise le courant alternatif à haute fréquence. En mode électrode positive, la couche d’oxyde est enlevée, et en mode électrode négative, la fusion de la tige s’effectue.

Diapositives 88 et 89

Dans la Zone Affectée Thermiquement (ZAT), l’écrouissage des alliages 1000, 3000 et 5000 disparait par recristallisation (diapo 38) et le durcissement structural des alliages 2000, 6000 et 7000 disparait par survieillissement (diapo 45). Il faut donc prévoir lors de la conception des calculs de résistance en tenant compte des valeurs abaissées des propriétés mécaniques. On peut aussi déplacer les soudures dans les zones moins affectées ou augmenter les épaisseurs. Lors du soudage, on peut minimiser l’énergie de soudage par l’usage de pulsations appropriées ou une vitesse de soudage rapide.

Diapositive 90

La couche d’oxyde (alumine) doit être diminuée en épaisseur avant le soudage. L’usage d’une brosse en acier inoxydable minimise les problèmes de corrosion du joint. Le joint doit être propre, c.-à-d. essuyé pour éviter la prise d’hydrogène atomique. L’aluminium a un bon coefficient de dilatation. Les joints sont souvent bridés dans des gabarits pour éviter le déplacement des deux parties à souder.

Diapositives 91 et 92

Le soudage par friction malaxage s’applique bien pour le soudage de joints accessibles et à plat idéalement. Le soudage est effectué par une tête rotative tournant à grande vitesse qui rend le métal pâteux. Après le déplacement de la tête, cette pâte durcit et constitue le joint soudé. Il n’y a pas de métal d’apport. Il est nécessaire de démarrer la soudure par perçage à l’extérieur des pièces et la terminer aussi à l’extérieur. Ce type de soudure minimise la ZAT. La diapo 91 donne d’autres procédés de soudage, plus rarement utilisés dans les PME.

Diapositives 94 et 95

L’anodisation se prête bien aux alliages recouverts d’une couche d’oxyde comme l’aluminium. C’est un procédé électrochimique qui permet d’augmenter la couche d’alumine en surface pour les raisons indiquées. La couche obtenue est dure et transparente et peut être colorée en ajoutant une étape de coloration. On doit tenir compte des surépaisseurs lors de la conception, surtout en anodisation dure plus épaisse, qui va jusqu’à 250 micromètres. Le procédé permet d’obtenir un fini résistant aux abrasions légères et est une solution alternative à la peinture.

Diapositive 96

Les étapes du procédé nécessitent des bains chauffés et du courant électrique. La couche étant poreuse, on doit la colmater à l’eau bouillante en fin de procédé. L’étape de coloration, si demandée, est effectuée dans la couche poreuse juste avant le colmatage.

Diapositive 97

Pour anodiser l’aluminium, on utilise un bain d’électrolytes, généralement l’acide sulfurique. L’aluminium à anodiser est placé en position anodique (on enlève les électrons qui maintiennent le réseau) et se dissout donc en Al3+ et réagit avec un dégagement d’oxygène pour former l’alumine Al2O3 en surface. La cathode utilisée est en plomb et est inerte. Elle reçoit les électrons qui sont captés par les ions H+ de l’électrolyte, ce qui dégage de l’hydrogène (réduction de la valence de l’ion H+ à 0).

Diapositives 98 et 99

Pendant le procédé d’anodisation, la couche d’oxyde s’épaissit en surface, mais elle est aussi attaquée par l’acide sulfurique du bain.

Ces deux phénomènes antagonistes créent une structure alvéolaire poreuse.

Diapositive 100

La couche peut être colorée par une solution colorante qui pénètre dans les pores. Après le colmatage final, la couche est scellée par l’alumine. La couleur reste emprisonnée sous une couche claire résistante.

Diapositives 101 et 102

Voici les paramètres et appellations des divers procédés d’anodisation selon la norme militaire MIL A 8625. Le type II classe 1 ou 2 demandées pour les applications esthétiques et le type III pour les applications antiusure (par exemple un guide-fil) ou les applications diélectriques sont les plus courantes. Le type III, anodisation dure, sort plus grisâtre et se prête moins bien à la coloration.

Diapositive 103

Les médailles de bronze et or montrées ont été anodisées après usinage. Rappel que la conception pour anodisation doit tenir compte de : provision de tolérances dimensionnelles augmentées en cas d’assemblage, trous de drainage dans les assemblages et l’évitement d’espaces restreints (par exemple accolage de pièces) qui pourraient retenir le bain d’anodisation et favoriser la corrosion ultérieure.

Diapositives 104 et 105

L’anodisation avec l’acide chromique est moins agressive pour la surface, ce qui augmente la résistance à la fatigue des pièces. Elle est utilisée comme base d’accrochage des peintures ou seule pour les pièces d’aéronautiques. Le Cr6+ étant cancérigène, on a remplacé ce type d’anodisation pour plusieurs applications, et ce même dans le secteur aéronautique. Les autres procédés d’anodisation ont des domaines d’utilisation plus pointus.

Diapositive 106

Les cristaux de silicium présents dans certains alliages ont un aspect noir après l’anodisation, ce qui donne un fini grisâtre aux alliages en contenant comme les pièces de fonderie. Certaines couleurs ne sont pas offertes. Certains ateliers d’anodisation réussissent quand même bien en coloration noire de l’alliage A356. Il en est de même pour les soudures effectuées avec le métal d’apport 4343 à 7,5 % silicium qui n’offrent pas une correspondance de couleur avec du 5052 par exemple.

Diapositive 107

La conversion chimique aux chromates est une attaque de la surface qui permet une transformation en chromates. Le chromate jaune avec Cr6+ étant cancérigène, il est passablement disparu du marché. Le procédé au chrome trivalent Alodine qui l’a remplacé, bien que moins résistant à la corrosion, respecte les normes ROHS. Le traitement est utilisé comme base d’adhésion de peinture.

Diapositive 108

Comme tout procédé de traitement de surface, une bonne préparation avant peinture est requise. En général, on utilisera une anodisation ou une conversion préliminaire pour les cas où la peinture est plus sollicitée.

Diapositive 109

Le poudrage électrostatique est une méthode économique pour peindre les pièces commerciales et est amplement utilisé. Certaines peintures qui cuisent à haute température peuvent affecter soit l’état T6 ou encore provoquer la formation de pustules sur les pièces moulées sous pression conventionnelle (non sous vide). Celles-ci contiennent de l’air emprisonné qui gonfle lors de la cuisson.

Diapositives 110 et 111

Les critères à prendre en compte lors du choix de la peinture sont variés. Par exemple, une peinture époxy est très résistante à l’abrasion, mais est peu résistante aux rayons UV, ce qui limite son usage extérieur. Une pièce creuse sera mieux couverte par immersion ou électrophorèse. Une très grosse pièce en condition de faible taux de production sera peinte au pistolet avec une peinture liquide.

Diapositive 112

Les procédés dignes de mention :

le grenaillage et brunissage où la surface est déformée mécaniquement par un outil rotatif afin de mettre celle-ci en compression. On l’utilise pour augmenter la résistance à la fatigue des produits faits à partir de tôles en aluminium.

Le polissage électrolytique pour obtenir un fini miroir.