Document de support de la présentation :

**Soudabilité des alliages d’aluminium**

Contenu développé par :

Théo Ouellet, ing. M. Sc.A.

# Diapositive 6

Pour tous les alliages d’aluminium, la couche d’oxyde (alumine Al2O3) se forme **immédiatement** dans l’air. Son épaisseur peut être modifiée par traitement thermique, par traitement électrochimique (anodisation) et les caractéristiques de l’air ambiant (humidité, température). Le procédé d’anodisation permet de contrôleur l’épaisseur de cette couche d’oxyde. Une couche épaisse permet une protection contre l’oxydation et il est possible de colorer le métal avec des pigments de couleur en utilisant les propriétés de la couche anodique.

L’épaisseur « normale » est suffisamment fine pour être enlevée mécaniquement (brossage), chimiquement (flux) ou durant l’opération de soudage par effet thermoïonique (décapage cathodique, voir diapositive 41).

Le point de fusion de l’alumine (Al2O3) est de 2050°C, et elle ne peut être fondue pendant l’opération de soudage. Il faut donc l’enlever ou la déplacer pour empêcher le manque de fusion ou le collage. Les procédés qui utilisent des flux à base de chlore ou de fluor (par exemple le brasage ou le soudage à l’électrode enrobée) doivent être suivis d’un nettoyage pour empêcher toute corrosion ultérieure. C’est d’ailleurs une des raisons qui a favorisé le développement des procédés de soudage sous gaz inerte.

L’oxyde d’aluminium est un isolant. Si la couche est trop épaisse (après anodisation ou de mauvaises conditions d’entreposage), elle peut gêner et même empêcher l’allumage de l’arc. Dans ces conditions, cette couche devra être enlevée, non seulement sur le joint, mais aussi au point de contact de la prise de retour du courant de soudage.

# Diapositive 7

L’hydrogène est très soluble dans l’aluminium à haute température, mais très peu à des températures plus basses. L’hydrogène, s’il ne peut s’échapper du bain de fusion qui se solidifie, formera des poches de gaz, c’est-à-dire des porosités. C’est ce gaz, l’hydrogène, qui est la cause de la plupart des porosités lors du soudage de l’aluminium.

Diapositive 8

Les alliages de la série 5000 sont plus enclins que les autres à former un oxyde hydraté. Il est donc recommandé d’entreposer les produits d’apport de cette série dans un endroit sec.

# Diapositive 9

Les alliages d’aluminium sont de bons conducteurs et en particulier l’aluminium pur (indice %IACS 65 à 66).

Le coefficient de conductibilité thermique de l’aluminium est environ 6 fois plus grand que celui de l’acier. Même si le point de fusion des alliages d’aluminium est très inférieur à celui des aciers, des énergies de soudage plus importantes sont nécessaires. Ceci est encore plus vrai pour les faibles vitesses de soudage où, par conductibilité thermique, la chaleur se dissipe et s’éloigne rapidement de la zone de l’arc, imposant un ajustement continuel des paramètres de soudage. Pour rendre les conditions de soudage plus stables, on privilégie une plus forte énergie de soudage avec une vitesse de soudage plus grande.

La bonne conductibilité électrique fait en sorte que la variation de la longueur terminale (distance entre le bout du tube contact et la pièce à souder) a très peu d’influence sur le courant de soudage et sur la longueur de l’arc au GMAW. En effet, la longueur terminale n’a pas d’influence sur le courant (dans le cas des aciers, une augmentation de la longueur terminale fait diminuer le courant). Cependant, cette distance devrait donc être maintenue à son minimum pour une meilleure protection gazeuse du bain de fusion.

# Diapositive 10

La plupart des pièces en aluminium peuvent être soudées. Tous les produits semi-finis (tôles, plaques, formes extrudées, pièces forgées, profilées, etc.). La composition de l’alliage est un paramètre beaucoup plus significatif que la forme pour évaluer la soudabilité d’un alliage.

Les pièces moulées en sable peuvent être soudées. Il faut cependant nettoyer la surface de la pièce (meuler légèrement la surface en contact avec le moule), puisque des grains de sable peuvent y être emprisonnés.

Les pièces moulées en moule permanent (par gravité et à l’air ambiant) sont sujettes, lors du soudage, à une porosité excessive dans le métal fondu et dans la zone de liaison à cause des gaz inclus lors de la fabrication. Cependant, la même pièce exécutée en moule permanent sous vide peut être soudée avec un taux d’inclusion très satisfaisant.

# Diapositive 12

Généralement, les alliages non thermodurcissables peuvent être soudés à l’aide de métaux d’apport de composition identique à celle du métal de base. Le métal d’apport peut, dans certains cas, contenir de faibles additions d’un affineur de grain, tel que le titane, pour diminuer la tendance à la fissuration à chaud. Par exemple, les compositions chimiques des alliages corroyés 5554 et 5556 sont identiques à celles des alliages d’apport 5554 et 5556, mis à part le titane qui a été ajouté dans les métaux d’apport.

Les alliages thermodurcissables ont un comportement métallurgique plus complexe et sont plus sensibles au phénomène de fissuration à chaud. Certains éléments d’addition comme le cuivre, le magnésium et le silicium peuvent augmenter le risque de fissuration à chaud en fonction du taux de chacun présent dans l’alliage. En règle générale, on utilise un métal d’apport dont la teneur pour ces éléments d’addition est plus élevée que celle du métal de base.

# Diapositive 13

De nombreux essais de soudabilité des alliages d’aluminium ont été menés dans le but de mesurer la sensibilité à la fissuration des différentes combinaisons de métaux d’apport et des métaux de base.

De ces essais, on peut tirer les grandes lignes suivantes :

* Les alliages de la série 1000 et l’alliage 3003 sont facilement soudables avec le métal d’apport 1100 ou avec l’alliage aluminium-silicium 4043.
* L’alliage 2219 présente le moins de risque de fissuration à chaud pour la série 2000 et est facilement soudable avec les métaux d’apport 2319, 4043 et 4145.
* Pour le groupe des alliages aluminium-cuivre (série 2000) et pour les alliages de fonderie aluminium-cuivre et aluminium-silicium-cuivre, la réalisation du joint à l’aide du métal d’apport 4145 présente le plus faible indice de fissuration.
* La susceptibilité à la fissuration des alliages aluminium-magnésium décroît lorsque la teneur en magnésium du métal fondu dépasse 2%. Les métaux d’apport à haute teneur en magnésium comme le 5356, le 5183 et le 5556 permettent le soudage à l’arc sous protection gazeuse (sans induire de problèmes majeurs), des alliages aluminium-magnésium (série 5000).
* Les métaux de base de la série 6000 sont plus facilement soudables avec les alliages d’apport aluminium-silicium tels que le 4043 et le 4047. Cependant, les alliages d’apport aluminium-magnésium (série 5000) peuvent aussi être une solution adéquate lorsque les métaux de base font partie du groupe des alliages à faible teneur en cuivre de la série 6000 et qu’une meilleure ductilité, et une meilleure résistance au cisaillement du métal fondu sont exigées. Les alliages de la série 6000 ne peuvent être soudés sans métal (fusion au GTAW) sans augmenter considérablement le risque de fissuration. Si l’alliage d’apport 4043 est utilisé, la soudure (le métal fondu) devra être constituée, au minimum, de 50% en métal d’apport. Alors que, si c’est l’alliage 5356 qui est utilisé, la soudure devra être constituée, au minimum, de 70% en métal d’apport.
* La série 7000 (aluminium-zinc) présente un indice plus ou moins fort de sensibilité à la fissuration. Cependant, les alliages 7005 et 7039, dont la teneur en cuivre est inférieure à 0,1%, sont caractérisés par un intervalle de solidification faible et peuvent être soudés aisément avec des alliages d’apport à forte teneur en magnésium, tels que le 5356, le 5183, ou le 5556. Les alliages dont la teneur en cuivre est plus importante, tels que le 7075 et le 7178, ont un intervalle de solidification très large (grand écart entre le liquidus[[1]](#footnote-1) et le solidus[[2]](#footnote-2)) et sont donc très sensibles à la fissuration lorsqu’ils sont soudés.

# Diapositive 14

Évolution de l’indice de sensibilité à la fissuration en fonction du pourcentage de l’élément d’addition :

* Graphique a), Aluminium-lithium, la concentration critique est à environ 3% de lithium.
* Graphique b), Aluminium-silicium, la concentration critique est à environ 0,75% de silicium.
* Graphique c), Aluminium-cuivre, la concentration critique est entre 2 et 3% de cuivre.
* Graphique d), Aluminium-silicium, la concentration critique est entre 1 et 2% de magnésium.
* Graphique e), Aluminium-Mg2Si, la concentration critique est à environ 1% de Mg2Si.

# Diapositive 15

Pour l’alliage 6061, la composition chimique est de 0,6% de silicium, 1% de magnésium et 0,28% de cuivre. Le taux de magnésium est dans la concentration critique et le taux de silicium est très près de la concentration critique.

L’alliage 6061 est très sensible à la fissuration à chaud. Il possède un grand intervalle de solidification, c’est-à-dire un écart de 70 °C entre le solidus (582 °C) et le liquidus (652 °C).

Le soudage de l’alliage 6061 sans métal d’apport (par exemple une fusion au GTAW comme sur la diapositive 15) est très risqué pour la fissuration à chaud. La fissuration à chaud est caractérisée par une fissure dans le centre de la soudure et se produit lors de la solidification.

Pour les alliages sensibles à la fissuration à chaud, le remplissage du cratère à la fin de la soudure est important pour éviter la présence de fissures dans ce dernier.

# Diapositive 16

Pour une combinaison de métaux de base et métal d’apport, il est possible d’estimer le risque de fissuration à chaud en calculant la composition chimique moyenne du métal fondu avec la notion du taux de dilution.

Le taux de dilution est le pourcentage d’un métal de base, ou d’un métal précédemment déposé, qui participe à l’élaboration du métal fondu d’une soudure. La diapositive 16 présente un schéma et une formule pour le calcul du taux de dilution.

# Diapositive 18

Pour l’exemple présenté sur la diapositive 18, l’aire de chaque zone peut être calculée avec des logiciels de traitement d’image. Pour estimer la composition chimique moyenne, on doit calculer la proportion des différents alliages.

Les plaques en 6061 représentent 40% de la soudure : (30+30)/(30+30+90) = 40%

Le métal d’apport en 4043 représente 60% de la soudure : (90)/(30+30+90) = 60%

Par exemple pour le taux moyen de silicium :

6061 : 0,6 % de silicium dans cet alliage, 0,6% x (60/150) = 0,24%

4043 : 5,25% silicium dans cet alliage, 5,25% x (90/150) = 3.15%

Taux moyen de silicium dans la soudure : 3,39%

Le 6061 possède un taux de critique de magnésium et le taux de silicium est proche de la valeur critique. En utilisant le métal d’apport 4043 avec un taux de dilution de 40% du métal de base en 6061, le taux moyen de magnésium dans la soudure est de 0,4%, donc en dehors de la zone critique pour le risque de fissuration (voir graphiques de la diapositive 14). Le taux moyen de silicium dans la soudure est de 3,39%, donc en dehors de la zone critique.

# Diapositive 19

Le choix du métal d’apport a une influence majeure sur la résistance des assemblages bout à bout. La chaleur qui provient de l’opération de soudage adoucit le métal adjacent au joint si l’état du métal de base est autre que l’état recuit, et dans la plupart des cas c’est la résistance de la ZAT (zone affectée thermiquement) qui déterminera la résistance de l’assemblage. L’image de la diapositive 19 montre les différentes zones d’un joint dont le métal de base est un alliage d’aluminium 5052-H38 (état écroui, non thermodurcissable).

# Diapositive 20

Un maintien au-dessus de la température de recristallisation pendant quelques secondes suffit à annuler les effets d’un durcissement par écrouissage, ce qui survient normalement sur des distances pouvant aller jusqu’à 40 mm dans toutes les directions à partir du centre de la soudure.

Pour un alliage non thermodurcissable, l’augmentation des propriétés mécaniques obtenues par écrouissage sera annulée, car une zone à l’état recuit est toujours présente dans la ZAT.

Le tableau de la diapositive 20 présente la résistance à la traction et la limite élastique pour deux alliages. Dans le cas du 3003, la limite élastique passe de 145 MPa pour l’état H14 à 41,4 MPa pour l’état recuit. Pour le 5052, la limite élastique est de 255 MPa à l’état H38 et 89,6 MPa à l’état recuit.

# Diapositive 21

Un alliage thermodurcissable nécessite un maintien de 2 à 3 heures à la température de recuit, suivi d’un refroidissement lent pour revenir à sa structure de recuit. Ce cycle ne survient jamais pendant l’opération de soudage et la zone affectée thermiquement sera constituée de plusieurs degrés de dissolution et de précipitation. La diminution des propriétés mécaniques de la ZAT dépendra fortement, pour une région donnée, du pic de température, du temps de maintien à cette température et de l’état métallurgique avant soudage (T4 ou T6, voir l’image de la diapositive 21). Il y a survieillissement lorsque l’alliage est à l’état T6 avant soudage et léger survieillissement s’il est à l’état T4 avant soudage.

Les facteurs tels que : la température de préchauffage, la température entre passes, l’énergie de soudage du procédé de soudage, la technique de soudage, l’utilisation de radiateurs de refroidissement et la vitesse de refroidissement influenceront les propriétés mécaniques dans la ZAT des alliages d’aluminium thermodurcissables. Le préchauffage, le refroidissement insuffisant entre passes, une vitesse de soudage faible ou un cordon avec mouvement oscillatoire sont des causes qui augmentent la température maximale atteinte, le temps de maintien à haute température et la largeur de la ZAT. Ce sont des paramètres qui réduisent les propriétés mécaniques de la zone affectée thermiquement.

# Diapositive 22

Le tableau de la diapositive 22 présente les propriétés mécaniques pour quelques alliages thermodurcissables. Les propriétés à l’état tel que soudé (*as welded*), dépendent de l’alliage du métal de base et du métal d’apport. L’état avant soudage n’a pas d’effet.

En fonction de la géométrie de l’assemblage mécanosoudée, un traitement thermique complet T6 après soudage (mise en solution, trempe et vieillissement) peut être réalisable ou non. Pour un cadre de vélo, sous certaines conditions, il est possible de faire un traitement thermique complet T6 après soudage. Dans ce cas, il est possible d’obtenir des propriétés mécaniques similaires au métal de base à l’état T6.

Cependant, pour des assemblages de très grandes dimensions (poteau de lampadaire) ou des assemblages avec des sections minces et épaisses ou géométries propices à la fissuration lors de la trempe, le traitement thermique T6 ne peut pas être réalisé. Dans ce cas, il est possible de faire le soudage à l’état T4 et faire le traitement de vieillissement après soudage. Par exemple, pour un alliage 6061 T4 soudé avec le métal d’apport 4043, la résistance en traction est de 186 MPa et la limite élastique est de 124 MPa à l’état tel que soudé. Avec un traitement thermique de vieillissement après soudage, la résistance en traction est de 241 MPa et la limite élastique est de 165 MPa.

Pour les alliages soudés avec le métal d’apport 5356, les propriétés à l’état tel que soudé sont supérieures comparativement au même alliage soudé avec le métal d’apport 4043 puisque le 5356 possède des propriétés mécaniques supérieures au 4043 (voir la diapositive 24). Cependant, il n’est pas recommandé d’effectuer un traitement thermique lorsque le soudage est fait avec le métal d’apport 5356 (risque de fissuration par corrosion sous contraintes, voir section 2.4 de la présentation à la diapositive 26).

# Diapositive 23

Le tableau de la diapositive 23 présente les propriétés mécaniques des alliages d’aluminium selon la norme CSA W59.2. Pour les alliages non thermodurcissables, les propriétés mécaniques dans la zone thermiquement affectée sont celles de l’alliage à l’état recuit, peu importe l’état d’écrouissage (H112, H14, H16, H32…) avant soudage.

# Diapositive 24

Le tableau de la diapositive 24 présente les valeurs de résistance à la rupture en fonction de l’alliage de base et du métal d’apport selon la norme W59.2. Le 5356 possède des propriétés supérieures au 4043. Pour le métal de base en 6063, les propriétés de cet alliage sont plus faibles que celles des métaux d’apport 4043 et 5356, raison pour laquelle la résistance est déterminée par le métal de base et non le métal d’apport dans ce cas.

# Diapositive 25

La ductilité des joints soudés des alliages non thermodurcissables est considérée comme excellente lorsque le métal d’apport est similaire au métal de base. Si l’on utilise l’essai de pliage libre comme mesure de la ductilité du métal fondu, on observe que c’est l’aluminium pur qui possède la meilleure ductilité. On relève aussi une excellente ductilité des joints lorsqu’ils sont effectués avec les métaux d’apport de la série 5000 sur des métaux de base de la série 5000.

Les joints soudés sur les alliages thermodurcissables sont caractérisés par une ductilité moindre que celle mesurée sur les alliages non thermodurcissables. De plus, comparée à l’état tel que soudé, la ductilité sera moindre si le joint subit un traitement de durcissement après soudage.

Pour illustrer la difficulté rencontrée lors de la sélection d’un métal d’apport en vue d’obtenir une bonne ductilité, voici quelques exemples :

* La ductilité d’un joint soudé réalisé sur alliages 6061 et 6063 est multipliée par 1,5 lorsqu’on choisit un métal d’apport de la série 5000 plutôt que le métal d’apport 4043.
* En choisissant un métal d’apport 4043 ou 4145 pour souder les alliages aluminium-cuivre (série 2000), le joint sera caractérisé par une basse ductilité. Cependant, dans les mêmes conditions, mais en choisissant l’alliage 2319 comme métal d’apport, le joint sera caractérisé par une ductilité jugée satisfaisante. Enfin, après un traitement de durcissement après soudage, le métal fondu du joint réalisé avec le métal d’apport 2319 aura alors la meilleure ductilité que l’on puisse obtenir avec les alliages du groupe aluminium-cuivre (série 2000).
* Les joints obtenus avec les alliages du groupe aluminium-zinc-magnésium-cuivre comme le 7075 et le 7178 sont caractérisés par une très basse ductilité (1% et moins). Cette basse ductilité et la grande sensibilité à la fissuration de ces alliages sont des contraintes qui deviennent vite insurmontables pour la plupart des applications où le soudage à l’arc pourrait être envisagé comme méthode d’assemblage. Pourtant, les alliages de la série 7000 à faible teneur en cuivre tels que le 7005 et le 7039 présentent une bonne ductilité de leurs joints lorsqu’ils sont soudés avec des métaux d’apport tels que le 5183, le 5356 ou le 5556.

Le manque de ductilité de la zone de liaison est un autre phénomène mis en évidence lorsqu’une pièce en alliage à forte teneur en silicium, tel que l’alliage de fonderie 356.0, est soudée avec une autre pièce en alliage à forte teneur en magnésium tel que le 5083. Ce cas illustre l’impossibilité de trouver une solution satisfaisante pour certains agencements de métaux de base.

En effet, si l’on choisit un métal d’apport aluminium-magnésium (série 5000) compatible avec la pièce en 5083, la zone de liaison du 356.0 se trouve fragilisée par le composé Mg2Si. Cependant, si l'on choisit un métal d’apport aluminium-silicium (série 4000) compatible avec la pièce 356.0, c’est la zone de liaison du 5083 qui sera caractérisé par un manque de ductilité. La solution à ce problème consiste donc à intercaler entre les deux pièces une entretoise en 6061 qui sera soudée à chacune des pièces avec des métaux d’apport différents, mais respectivement compatibles avec l’alliage de l’entretoise.

# Diapositive 26

L’utilisation des métaux de base et d’apport de la série 5000 dont la teneur en magnésium excède 3% n’est pas recommandée pour des températures d’utilisation supérieures à 60°C, car ils peuvent être sujets à la fissuration par corrosion sous contrainte. Celle-ci est causée par un maintien prolongé de températures variant de 60 à 230 °C, ce qui augmente la précipitation de Mg5Al8 (phase bêta). Les précipitations se retrouvent principalement aux joints de grains, comme de petites particules individuelles, ou si l’effet est plus grand, un film continu ou presque continu de phase se forme aux joints de grains. Aucune précipitation ne se produit à des températures supérieures à 280 °C. Au contraire, le précipité qui se forme à des températures plus basses se dissout à une température égale ou supérieure à 230 °C[[3]](#footnote-3).

L’alliage 5454 pour les métaux de base et d’apport a été développé spécifiquement pour disposer d’un alliage de la série 5000 résistant à des températures élevées.

# Diapositive 27

Le tableau de la diapositive 27 présente la résistance en traction en fonction de différentes températures d’utilisation. Les alliages de la série 5000 avec plus de 3 % de magnésium ne sont pas utilisés pour des températures supérieures à 66 °C (voir note D du tableau de la diapositive 27).

Pour les alliages du tableau de la diapositive 27 :

* 2,5 à 2,7 % Mg, donc moins de 3% de magnésium : 5052, 5454 et 5554
* 4 à 5,1 % Mg, donc plus de 3% de magnésium : 5086, 5083, 5183, 5356, 5456 et 5556

# Diapositive 28

Les alliages de la série 5000, dont la teneur en magnésium est élevée, ont une bonne soudabilité et affichent d’excellentes propriétés à basse température. C’est ce qui explique leur utilisation intensive dans le domaine cryogénique pour les appareils d’entreposage et de transport de l’oxygène et du gaz naturel liquéfié.

# Diapositive 30

Selon la théorie des potentiels de corrosion, l’alliage dont le potentiel est le plus négatif tend à protéger de la corrosion les autres éléments de l’assemblage (dont les potentiels de corrosion sont moins négatifs) en se corrodant. Pour un assemblage avec le métal d’apport 5356 (-0,87) et des plaques 6061-T6 (-0,82 à -0,83)), le cordon de petite taille va se corroder rapidement pour protéger le reste de l’assemblage, qui lui est de grandes dimensions. En résumé, on peut retenir que plus la taille des pièces à protéger est grande et que plus la différence des potentiels de corrosion est importante, plus l’action corrosive sera rapide.

Pour obtenir une résistance à la corrosion optimale, il faut choisir un métal d’apport dont le potentiel de corrosion est identique à celui du métal de base (par exemple : le métal d’apport 4043 avec le métal de base 6061-T6). Dans le cas où un tel choix serait impossible, il est préférable de prendre des dispositions telles que le métal de base (dont les dimensions sont importantes) soit plus négatif par rapport au métal du joint (dont les dimensions sont beaucoup plus petites), par exemple le métal de base 7005-T6 (-0,93 à -0,96) avec le métal d’apport 5356 (-0,87).

# Diapositive 31

Par agencement, on entend la similitude des couleurs entre le métal de base et le métal du joint après anodisation. Cette similitude doit être obtenue après l’étape de finition, qui est souvent chimique ou électronique. La couleur, après cette étape de finition, dépend de la composition chimique de l’alliage. Idéalement, il faudrait que le métal d’apport ait exactement la même composition chimique que le métal de base pour obtenir, après traitement, une similitude parfaite des couleurs. Pour la plupart des alliages d’aluminium non thermodurcissables, cet agencement entre les métaux de base et d’apport ne pose pas de problème particulier.

Cependant, cela est plus complexe pour les alliages thermodurcissables, et ce, à cause de leur sensibilité à la fissuration à chaud. On utilise alors des alliages différents pour le métal de base et le métal d’apport, tout en considérant que la réponse au traitement de finition devra être la plus semblable possible.

Pour les alliages d’aluminium, on doit porter une attention particulière au silicium. Le silicium, selon sa teneur, va colorer l’alliage avec des tons qui s’échelonnent du gris au noir.

# Diapositive 32

Les métaux d’apport recommandés pour obtenir un bon agencement des couleurs avec plusieurs métaux de base sont présentés dans le tableau de la diapositive 32. Les métaux de base 6061 et 6063, qui sont souvent soudés avec le métal d’apport 4043, représentent un cas typique de sélection du métal d’apport qui n’a pas été réalisée en fonction de l’agencement des couleurs après anodisation. En effet, cette combinaison colorera le joint en noir après anodisation, ce qui n’aurait pas été le cas si le métal d’apport choisi avait été le 5356.

# Diapositive 33

La diapositive 33 présente deux plaques d’aluminium en 6061 soudées avec des métaux d’apport différents. Celle soudée avec le métal d’apport 5356 présente un agencement des couleurs similaire entre la plaque et la soudure.

Cependant, celle soudée avec le métal d’apport 4043, qui contient 5,25% de silicium, le cordon de soudure a une teinte grise comparativement au reste de la plaque.

# Diapositive 34

La sélection finale d’un métal d’apport pour le soudage d’un ou d’une combinaison de métaux de base doit se faire après une analyse exhaustive des performances attendues du joint. Habituellement, il est souvent possible de choisir un métal d’apport qui n’affectera pas ou peu sa soudabilité (risque de fissuration).

La diapositive 34 présente une section d’une matrice de sélection utilisée lors du choix des métaux d’apport pour les procédés GTAW et GMAW[[4]](#footnote-4). On y retrouve une note qualitative associée aux différentes combinaisons de métaux de base et métal d’apport en fonction des différents critères de sélection.

Pour les notes qualitatives A à D, ainsi que la définition des différents critères, se référer à la page suivante. Le critère de sélection « résistance à la corrosion » est pour l’eau claire ou l’eau salée et n’est pas nécessairement applicable aux autres milieux.

# Diapositive 36

Le procédé GTAW manuel permet un bon contrôle du bain de fusion et de la pénétration des joints exécutés d’un seul côté, ce qui permet le soudage sans support arrière. Cependant, avec le procédé GTAW mécanisé et le procédé GMAW mécanisé ou non, l’utilisation d’un support arrière est fortement recommandée pour contrôler l’uniformité de la pénétration des joints exécutés, d’un côté seulement (exemple : assemblage A avec support temporaire).

Pour la réalisation de joints avec des passes des deux côtés, le support temporaire peut provenir du méplat de la préparation (exemple : dimension de 4,8 mm pour l’assemblage C) ou d’une cale rapportée. Dans les deux cas, un gougeage arrière jusqu’au métal sain sera nécessaire avant l’exécution de la première passe arrière.

Avec le procédé GMAW, l’angle d’ouverture de 60° sur préparation en V, est standard. Avec le procédé GTAW, l’angle d’ouverture varie de 60° à 90° et passe à 110° minimum pour la position au plafond (4G) pour un bon contrôle de la passe de fond. Les grands angles d’ouverture sont nécessaires pour permettre le passage de la buse et obtenir ainsi une protection gazeuse suffisante pour la passe de fond.

# Diapositive 37

Une préparation en U avec chanfrein a été mise au point pour le soudage à passes multiples d’un côté seulement des tuyaux.

# Diapositive 38

Lorsqu’un joint soudé est exécuté d’un côté seulement, l’oxyde qui s’est formé sur la face arrière ne peut pas être enlevé par l’effet thermoïonique de l’arc (décapage cathodique, voir diapositive 41). Cependant, cet oxyde doit être écarté du joint si l’on veut obtenir la fusion de la racine et une pénétration complète du joint. Pour cela, une surépaisseur à l’envers beaucoup plus importante que celle permise avec d’autres matériaux doit être imposée. Les valeurs courantes de ces surépaisseurs en fonction des épaisseurs du matériau à souder sont présentées à la diapositive 38.

# Diapositive 39

Les taches d’eau, les oxydes provenant d’un traitement thermique, les revêtements et les couches anodisées doivent être enlevés chimiquement ou mécaniquement avant soudage. Des brosses en acier inoxydable sont utilisées pour éviter la contamination du joint par la rouille qui pourrait provenir d’une brosse d’acier. Si ces brosses métalliques sont utilisées sur des outils rotatifs dans le but d’enlever des films d’oxyde épais, la pression sur l’outil devra être légère. En effet, une trop grande pression aura pour effet d’enfoncer les particules d’oxyde dans le métal, ce qui augmentera le nombre des discontinuités plutôt que de les éliminer.

Les traces d’humidité peuvent être enlevées par un léger préchauffage des surfaces du joint. Cependant, une brève élévation de la température (120 °C) pour les alliages de la série 5000 peut conduire à une baisse de la résistance à la corrosion et à une baisse des propriétés mécaniques pour les alliages thermodurcissables.

Finalement, les conditions optimales sont réunies lorsque le métal est propre, sec et que la couche d’oxyde a une épaisseur minime. Pour les soudures à passes multiples, il est courant de brosser le joint après chacune des passes pour éliminer tout dépôt et toute trace d’oxyde avant la passe suivante.

# Diapositive 41

Le procédé GTAW est couramment utilisé pour le soudage de pièces en alliage d’aluminium dont l’épaisseur s’échelonne de 0,25 mm à 15 mm, et ce, en toutes positions. Caractérisé par une faible vitesse de soudage, il permet aussi au soudeur de s’adapter facilement aux changements imposés par un joint qui change d’orientation dans l’espace, comme c’est le cas pour le soudage des tuyaux ou de pièces dont la géométrie varie fortement. Ce procédé permet aussi un contrôle de la pénétration tout en produisant des soudures de bonne qualité. Enfin, le cratère de fin de cordon peut facilement être rempli en diminuant progressivement le courant de soudage, soit à l’aide d’une pédale de contrôle, soit à l’aide d’un dispositif automatisé d’extinction de l’arc.

Le soudage avec le procédé GTAW en courant alternatif permet d’obtenir autant le décapage du film d’oxyde d’aluminium pendant la moitié du cycle, c’est-à-dire, lorsque l’électrode est positive, que l’obtention d’une forte pénétration durant l’autre moitié du cycle, c’est-à-dire, lorsque l’électrode est négative. Lorsque l’électrode est positive, les électrons vont de la plaque vers l’électrode, ce qui permet de briser la couche d’oxyde. Lorsque l’électrode est négative, les électrons vont de l’électrode vers la plaque, ce qui apporte plus de chaleur à la plaque, et donc plus de fusion (voir les images de la diapositive 41).

L’argon est le gaz de protection normalement utilisé avec ce procédé. Cependant, lorsqu’on veut améliorer la pénétration ou lorsqu’on soude de fortes épaisseurs, un mélange d’argon et de 25 % à 50 % d’hélium est parfois recommandé.

Lors du soudage en courant alternatif, le courant change périodiquement de sens avec une fréquence de 60 hertz et passe donc par la valeur « 0 » 120 fois par seconde. Lorsque le courant passe par 0, l’arc s’éteint et doit donc se rallumer à chaque inversion du sens du courant. Lorsque la polarité devient négative, le rallumage se produit aisément, car l’électrode a encore un haut pouvoir thermoïonique et émet facilement les électrons qui constituent le courant d’arc. Cependant, lorsque l’électrode devient positive, c’est la pièce qui doit émettre les électrons qui constituent le courant d’arc, puisque c’est elle qui constitue le pôle négatif. Or, la pièce en aluminium possède un pouvoir émissif beaucoup plus faible, ce qui peut rendre le réamorçage de l’arc difficile et dans certains cas impossibles. Le soudage GTAW en courant alternatif avec onde sinusoïdale à 60 hertz requiert l’utilisation d’une haute fréquence en continu pour maintenir la colonne de gaz ionisé pendant le changement de polarité.

Certaines sources permettent de saturer positivement ou négativement l’onde alternative, ce qui modifie le pourcentage du temps où la polarité de l’électrode est négative ou positive. En augmentant le pourcentage de la polarité négative de l’électrode, on améliore l’action pénétrante de l’arc au détriment de son action décapante qui doit cependant être maintenue à un niveau acceptable. En général, jusqu’à 65% d’électrode négative et 35% d’électrode positive pour le maximum de pénétration et jusqu’à 55% d’électrode positive et 45% d’électrode négative pour le maximum de nettoyage.

Pour le soudage GTAW en courant alternatif, on utilise des électrodes de tungstène pur ou de tungstène avec oxyde de zirconium, qui, durant l’opération de soudage, forment une boule au bout de l’électrode sur laquelle vient s’établir l’arc.

# Diapositive 42

Une source de courant GTAW avec onde carrée permet un réamorçage plus efficace de l’arc par des temps de passage du courant maximum positif au courant maximum négatif presque nuls (pas de passage lent à 0 comme pour l’onde sinusoïdale 60 hertz).

Les sources de courant avec une onde carrée permettent de faire varier la fréquence du courant alternatif. Avec ces sources de courant, il faut utiliser des électrodes de tungstène avec cérium ou lanthane (aussi possible avec les tungstènes avec oxyde de thorium). Par exemple, avec une source à onde carrée, on utilise des électrodes de tungstène avec cérium ou lanthane pour souder en courant alternatif avec 75% d’électrode négative et une fréquence du courant alternatif de 120 hertz. Ceci permet au tungstène de demeurer pointu lors du soudage en courant alternatif. L’arc est donc plus stable.

Les sources à onde carrée possèdent plus de possibilités de réglage de paramètres comparativement à une source sinusoïdale 60 hertz (comme le montre l’image de la diapositive 42, possibilité de choisir la forme d’onde). Le principal inconvénient du soudage en courant alternatif avec une source à onde carrée est le niveau d’intensité sonore relativement élevé lors du soudage.

# Diapositive 43

Dans le but de réduire le niveau d’intensité sonore lors du soudage en courant alternatif avec les sources à onde carrée, la majorité des compagnies qui fabriquent des sources de courant proposent différentes formes d’ondes. Au lieu d’utiliser une onde parfaitement carrée, il est possible d’utiliser une onde carrée arrondie qui diminue le niveau d’intensité sonore tout en gardant les avantages de l’onde carrée (tungstène pointu et stabilité de l’arc). Le graphique de la diapositive 43 présente la différence d’intensité sonore entre une onde carrée et une carrée arrondie. Pour un courant de soudage de 150 ampères, plus de 80 dbA avec une onde carrée et un peu plus de 70 dbA avec une onde carrée arrondie.

# Diapositive 44

Vidéo du CMQ présentant le procédé de soudage GTAW.

Lien vers la galerie des vidéos du CMQ : <https://cmqtr.qc.ca/galerie-videos/>

Lien YouTube du vidéo soudage GTAW : <https://www.youtube.com/watch?v=b1B0TF4YuoI>

# Diapositive 45

La photo en haut à droite de la diapositive 45 présente une des plaques avant soudage. Présence de liquide de coupe séché et poussières dans la partie supérieure de la plaque. Nettoyage de la section inférieure avec éthanol et ensuite brossage avec une brosse en acier inoxydable.

La photo en bas à gauche présente le résultat de l’exécution d’une ligne de fusion dans la zone de la section supérieure sans nettoyage et ensuite avec les mêmes paramètres de soudage, exécution d’une ligne de fusion dans la section nettoyée de la plaque. La fusion dans la zone nettoyée donne un bon résultat tandis que celle dans la zone sans nettoyage présente de la contamination.

La photo en bas à droite présente le résultat du soudage GTAW avec métal d’apport ER4043 dans la zone de la section supérieure sans nettoyage et ensuite avec les mêmes paramètres de soudage, exécution du soudage dans la section nettoyée de la plaque. La soudure dans la zone nettoyée donne un bon résultat tandis que celle dans la zone sans nettoyage présente de la contamination.

# Diapositive 47

C’est le procédé le plus utilisé pour le soudage en série de composantes en alliages d’aluminium. L’équipement est compact et permet le soudage dans toutes les positions. L’utilisation (exclusive) de la polarité de l’électrode positive permet un nettoyage continuel du bain, un taux de fusion important et le soudage d’une large gamme d’épaisseurs, sans la nécessité d’un préchauffage. Le métal d’apport est amené automatiquement et continuellement à la torche où il fond pour former la soudure.

L’argon est le gaz de protection le plus utilisé. Cependant, pour le soudage sur des plaques épaisses, un mélange d’argon avec 25, 50 et même 75 % d’hélium améliore la pénétration et les caractéristiques du joint.

L’équipement optimal pour le dévidage du fil est présenté à la diapositive 47.

# Diapositive 48

La photo dans la partie supérieure droite de la diapositive 48 présente un assemblage en aluminium de 1200 mm de longueur. Le soudage est effectué avec un robot.

Les limitations du procédé GMAW sont définies par le risque de manque de fusion, surtout si les paramètres ne sont pas bien adaptés à la configuration du joint. Comparativement au procédé GTAW, il présente un plus grand risque de porosités, surtout avec les métaux d’apport de la série 5000 (possibilité d’oxyde hydraté en surface si mauvaises conditions d’entreposage).

Les photos dans le bas de la diapositive 48 montrent deux éprouvettes de textures dont une avec des porosités. La différence entre les deux éprouvettes est la position de soudage. Lors du soudage dans la position à l’horizontale (2GF, photo en bas à gauche) avec un fil qui a été en contact avec l’humidité de l’air relativement longtemps, l’hydrogène présent dans le bain de fusion reste emprisonné dans la soudure comparativement à la position à plat (1GF, photo en bas à droite) qui permet un dégazage plus facile de l’hydrogène.

# Diapositive 49

La conductibilité électrique varie d’un alliage à l’autre. Le ER1100 a une conductivité électrique de 59% IACS (*International Annealed Copper Standard*, Cuivre pur =100% IACS), le ER4043 a 42% IACS et le ER5356 a 29% IACS. Cette variation a une incidence directe sur le courant de soudage. Par exemple, pour un fil de 1,2 mm de diamètre, pour une même valeur de courant, la vitesse de fil sera environ 17 % plus basse pour un ER4043 comparativement à un ER5356 (voir le tableau de la diapositive 49).

Lors du soudage en mode pulsé, il est donc très important de choisir la bonne ligne synergique sur la source de courant (type de fil et diamètre utilisé) pour éviter des problèmes lors du soudage.

La bonne conductibilité électrique fait en sorte que la variation de la longueur terminale a très peu d’influence sur le courant de soudage et sur la longueur de l’arc au GMAW. En effet, la longueur libre du fil électrode n’a pas d’influence sur le courant (dans le cas des aciers, une augmentation de la longueur terminale fait diminuer le courant). Cependant, cette longueur libre devrait donc être maintenue à son minimum pour une meilleure protection gazeuse du bain de fusion.

# Diapositive 50

Pour une même valeur de courant, la vitesse de fil est plus faible avec le fil ER4043, cela se traduit par une pénétration plus grande avec le ER4043 versus le ER5356. Pour le soudage à 200 ampères, la vitesse de fil est de 360 po/min avec le fil ER4043 et 55% de dilution, tandis qu’elle est de 440 po/min de fil pour le ER5356 et 30% de dilution (voir les photos sur la diapositive 50).

# Diapositive 51

Pour une même valeur de courant, la vitesse de fil est plus faible avec un ER4043, cela se traduit par une pénétration plus grande avec le ER4043 versus le ER5356. Pour le soudage à 225 ampères, la vitesse de fil est de 410 po/min avec le fil ER4043 et 50% de dilution, tandis qu’elle est de 495 po/min de fil pour le ER5356 et 30% de dilution (voir les photos de la diapositive 51).

# Diapositive 53

Les produits de transition sont réalisés par colaminage, par soudage par explosion[[5]](#footnote-5), par soudage par friction, par soudage par diffusion, par ultrason et représentent la solution la plus simple pour le soudage des alliages d’aluminium à des pièces de matériaux différents.

Des procédés conventionnels comme le GTAW, le GMAW ou le soudage par résistance peuvent alors être utilisés pour le soudage des deux parties en aluminium en respectant, bien entendu, les précautions d’usage. L’autre partie de la pièce de transition sera soudée selon une procédure adaptée au matériau utilisé.

De nombreux matériaux différents peuvent être soudés directement aux alliages d’aluminium à l’aide des procédés mentionnés plus haut. À ceux-ci, on peut ajouter le brasage qui peut être utilisé avec des pièces (en alliages différents) qui ont reçu un placage électrochimique ou par immersion à chaud. Ceci permet une diffusion plus profonde lors du brasage.

# Diapositive 54

Lien vers le site du produit semi-fini bimétallique utilisé pour le soudage de l’assemblage de la diapositive 53 : <https://triplate.com/>

# Diapositive 55

Les avancées technologiques dans le domaine des sources de courant de soudage permettent un meilleur contrôle de l’arc. En GMAW, le développement de lignes synergiques facilite l’utilisation du soudage pulsé et de différents modes de transfert contrôlés.

Pour imprimer des pièces avec le procédé WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*, fabrication additive par soudage à l’arc), la stabilité du procédé de soudage et le contrôle de l’énergie de soudage sont des critères très importants. En couplant une source de courant à un système robotique, il est possible d’exécuter des trajectoires complexes avec une bonne précision.

Les procédés de fabrication additive à partir d’un fil permettent un taux de déposition élevé comparativement aux technologies avec poudre. Cependant, les technologies avec poudre possèdent une plus grande précision dimensionnelle. Le WAAM est un procédé peu coûteux et rapide, comparativement aux autres procédés de fabrication additive métallique sur le marché. Si le matériau à imprimer est disponible en bobine de fil GMAW ou MCAW, il est possible d’imprimer des prototypes avec le procédé WAAM. Il est possible d’imprimer des prototypes à très faible coût avec du fil d’aluminium ER4043.

La diapositive 55 présente l’impression d’une réplique de la coupe Stanley. Le taux de déposition obtenu lors de l’impression de cette pièce est de 8,82 g/min (vitesse de fil moyenne de 115 po/min), pour une paroi d’environ 3 mm d’épaisseur. Le temps d’impression pour la fabrication de cette pièce est de 103 minutes (soudage en continu) et la masse d’aluminium déposée est de 908,5 g.

# Diapositive 56

Vidéo de fabrication additive à l’arc, utilisation de différents filtres par le caméraman lors de la prise de vue pour réduire la luminosité de l’arc. La vitesse de fil est d’environ 100 po/min avec un courant moyen de 40 ampères et une tension moyenne de 12 volts.

# Diapositive 57

Pour les différentes pièces de la diapositive 57, le taux de déposition varie de 7 g/min pour le cône (pièce à paroi mince en haut à droite sur la photo de la diapositive 57) à 20 g/min pour le prisme rectangulaire (bloc de 55 mm de largeur et 110 mm de longueur dans le centre de la photo de la diapositive 57).

1. Liquidus : température pour laquelle le métal est totalement liquide [↑](#footnote-ref-1)
2. Solidus : température pour laquelle le métal est totalement solide, entre le solidus et le liquidus, il y a coexistence de liquide et de solide [↑](#footnote-ref-2)
3. Norme W59.2-M1991, article 5.13.4, page 40. [↑](#footnote-ref-3)
4. Lien : https://www.hobartbrothers.com/wp-content/uploads/2020/09/Aluminum-Selection-Chart.pdf [↑](#footnote-ref-4)
5. Lien pour vidéo sur le soudage par explosion : https://www.youtube.com/watch?v=u9\_bqafUJfA [↑](#footnote-ref-5)