



## CERN - TS Department

EDMS Nr: 590564  
Référence groupe: TS-MME

TS-Note-2005-031  
25 mai 2005

### LE SOUDAGE DE L'ALUMINIUM ET DE SES ALLIAGES

G. Favre

#### Résumé

Le soudage de l'aluminium requiert un savoir-faire spécifique pour éviter la formation, dans la soudure, de défauts rédhibitoires tels que les manques de fusion ou soufflures. Ces défauts ont pour causes principales la présence d'une couche d'alumine, une diffusivité thermique élevée et une solubilité très faible de l'hydrogène dans le métal à l'état solide. Les règles de l'art à appliquer pour la préparation des assemblages et pour le choix des paramètres de soudage sont rappelées.

Les divers procédés de soudage mis en œuvre par la section TS-MME-AS (faisceau d'électrons, laser, TIG, MIG) sont ensuite exposés à travers quelques applications récentes liées au LHC et à ses expériences.

Enfin, une nouvelle technologie, le Friction Stir Welding (FSW), est présentée. Ce procédé de friction malaxage se déroule à l'état pâteux sans fusion. Il permet de réaliser des assemblages bout à bout avec les avantages du soudage par friction : absence de soufflure, faibles déformations, faible échauffement du métal de base, conservation en grande partie des propriétés mécaniques des métaux de base. Ses applications industrielles se développent rapidement notamment dans l'aéronautique, le matériel de transport et la construction navale.

## 1 INTRODUCTION

Pour comprendre les phénomènes intervenant dans la soudabilité de l'aluminium et de ses alliages, il convient de rappeler quelques notions de base sur les propriétés physique de l'aluminium pur et sur le rôle des éléments d'alliage.

### 1.1 Propriétés physiques de l'aluminium pur

- Température de fusion : 660°C. Cette température s'abaisse avec l'accroissement du pourcentage des éléments d'alliage.
- Coefficient de dilatation linéique moyen entre 20°C et 300°C :  $\alpha=25.4.10^{-6}K^{-1}$
- Conductibilité thermique à 20°C : 217,6 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. La conductivité thermique s'abaisse avec l'accroissement du pourcentage des éléments d'alliage.

### 1.2 Alliages trempants et non trempants

Selon les éléments d'alliage principaux, les alliages d'aluminium sont classés en huit séries :

- 1 xxx : aluminium non allié
- 2 xxx : aluminium / cuivre (0.5 à 8%)
- 3 xxx : aluminium / manganèse (1 à 3%)
- 4 xxx : aluminium / silicium (0.5 à 13%)
- 5 xxx : aluminium / magnésium (3 à 8%)
- 6 xxx : aluminium / magnésium / silicium (Mg : 1.5 à 3% / Si : 0.3 à 1.5%)
- 7 xxx : aluminium / zinc (4 à 5%)
- 8 xxx : aluminium / autres (Fe, Li, Zr, etc.)

On distingue deux familles d'alliages d'aluminium, les alliages à durcissement structural dits « trempants » et les alliages sans durcissement structural dits « non trempants ».

Les alliages sans durcissement structural, séries 1xxx / 3xxx / 4xxx / 5xxx sont durcissables uniquement par écrouissage (déformation à froid).

Les alliages à durcissement structural, séries 2xxx / 6xxx / 7xxx sont durcissables par précipitation (trempe + revenu). Ils sont également durcissables par écrouissage. Le traitement de trempe structurale comprend une mise en solution des éléments d'alliage suivie d'un refroidissement suffisamment rapide (vitesse de l'ordre de 100°C.s<sup>-1</sup>) pour maintenir, à la température ambiante, la solution solide existant à des températures plus élevées. Il s'agit de l'état de trempe fraîche<sup>1</sup> où les éléments d'alliage sont en sursaturation. Un traitement de revenu ultérieur, à la température ambiante<sup>2</sup> ou à une température plus élevée, conduit à un durcissement de l'alliage. Le durcissement s'explique par un phénomène de précipitation résultant de la décomposition de la solution solide sursaturée (hors équilibre) au cours du maintien isotherme. Le durcissement obtenu est fonction du temps et de la température de maintien<sup>3</sup>.

Les différents états métallurgiques sont symbolisés par une lettre. On distingue les états O : état recuit, H : état durcis par écrouissage, W : état instable de trempe fraîche après homogénéisation à haute température, T : état durci par revenu.

## 2 SOUDAGE

La soudabilité de l'aluminium et de ses alliages est dominée par les caractéristiques physico-chimiques suivantes:

---

<sup>1</sup> L'état de trempe fraîche ne se maintient que quelques heures. S'ensuit une maturation naturelle conduisant à un durcissement.

<sup>2</sup> Maturation

<sup>3</sup>Traitements de sous-revenus ou sur-revenus permettent de trouver un bon compromis entre résistance mécanique, ductilité, ténacité et résistance à la corrosion. Les propriétés mécaniques les plus élevées (Re, Rm) sont obtenues dans l'état trempé revenu dur (T6).

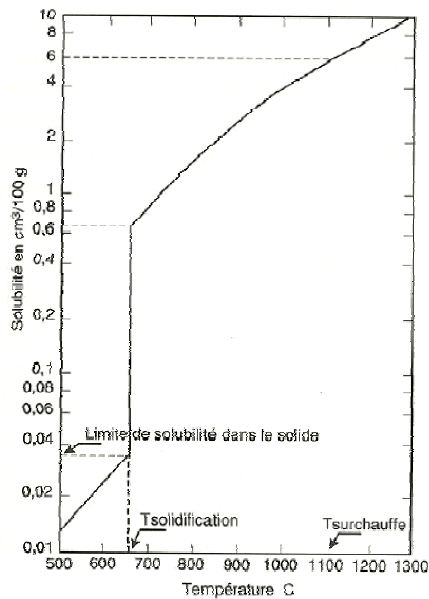
- Une conductibilité thermique élevée susceptible de générer des manques de fusion (collages),
- La présence d'alumine en surface responsable de la formation de soufflures et à l'origine d'inclusions,
- Une très faible solubilité de l'hydrogène dans l'état solide à l'origine de la formation des soufflures,
- Le risque de fissuration à chaud pour certains alliages trempants,
- Un coefficient de dilatation thermique élevé à l'origine de retraits de soudage importants et de la tendance à la déformation des pièces assemblées par soudage.

## 2.1 Mécanismes de formation des défauts / remèdes

Les défauts rencontrés dans le soudage des alliages d'aluminium (soufflures, manques de fusion, fissuration à chaud) peuvent être limités voire supprimés par une préparation adaptée des pièces à assembler, un choix judicieux des paramètres de soudage et un entretien rigoureux du matériel de soudage.

### 2.1.1 Soufflures

La formation de soufflures est principalement liée à la présence d'hydrogène dans le bain de fusion. La solubilité très élevée de l'hydrogène à l'état liquide est quasi nulle à l'état solide, de l'ordre de 0.1 ppm pour l'aluminium pur (figure 1).



**Figure 1 : Solubilité de l'hydrogène dans l'aluminium en fonction de la température**

Les sources principales d'hydrogène sont les pollutions de surface des métaux de base et des métaux d'apport, l'humidité absorbée par la couche d'alumine, une mauvaise protection du bain de fusion, l'endommagement du circuit de gaz. En raison de la conductibilité thermique élevée de l'aluminium, la solidification rapide du bain ne laisse généralement pas suffisamment de temps au dégazage du métal fondu. Toute source d'hydrogène doit, de ce fait, être éliminée.

Une attention particulière doit être apportée à la propreté des pièces qui doivent être dégraissées. La condensation de la vapeur d'eau sur les métaux de base et d'apport doit être limitée par un stockage approprié<sup>4</sup>. Le circuit de gaz doit être purgé durant plusieurs minutes avant le démarrage

<sup>4</sup> L'humidité des pièces se caractérise par la présence de soufflures dans les premiers centimètres du cordon de soudure, soufflures qui diminuent progressivement par l'effet de préchauffage dû au soudage.

d'une nouvelle opération de soudage pour éliminer les traces d'humidité dans les gaines et au niveau de la torche de soudage. La protection du bain par le gaz de soudage doit être efficace. Elle peut être détériorée par un mode opératoire inadapté (torche trop soulevée ou mauvaise inclinaison de celle-ci, circuit de gaz endommagé) qui permet à l'air ambiant de venir au contact du bain de fusion. Il suffit de 250 ppm d'hydrogène dans le plasma d'arc pour provoquer une quantité de soufflures non acceptable. Lorsque cela est possible, la position de soudage doit être choisie pour permettre un dégazage aisé du bain (soudage à plat). Le dégazage est par exemple difficile, voire impossible, en soudage vertical descendant ou en soudage au plafond. Ces situations se rencontrent en soudage orbital où il est particulièrement difficile de supprimer totalement la formation de soufflures. Enfin, l'emploi d'hélium, gaz « chaud », dans le gaz de protection peut limiter le taux de soufflures en permettant un meilleur dégazage du bain.

### 2.1.2 *Manques de fusion*

Les manques de fusion ou collages sont liés à la forte conductibilité thermique de l'aluminium. Le risque augmente avec l'épaisseur des pièces à souder ou dans le cas d'assemblages d'éléments de différentes épaisseurs.

Ces défauts sont limités par l'emploi de paramètres visant à augmenter l'énergie de soudage (emploi d'hélium dans le gaz de protection, soudage forte intensité), par le choix d'une configuration d'assemblage adaptée permettant de garantir une bonne fusion des bords. L'ouverture du chanfrein doit être importante en soudage TIG et MIG, pour permettre une incidence correcte de l'arc. Dans le cas du soudage de fortes épaisseurs ou d'assemblages d'épaisseurs différentes, il est en général indispensable de préchauffer les pièces de l'ordre de 100°C à 150°C.

### 2.1.3 *Inclusion d'alumine*

L'alumine est sous forme « pure »  $Al_2O_3$  pour l'aluminium non allié, ou sous forme d'un mélange d'oxydes pour les alliages. Son épaisseur, de l'ordre de 0.01  $\mu m$  pour une couche fraîchement constituée, atteint plusieurs  $\mu m$  après quelques semaines. Cet oxyde réfractaire (température de fusion 2030°C) n'est pas fondu dans l'arc de soudage et ne se dissout pas dans l'aluminium liquide. On retrouve l'alumine sous forme de « peaux » dans la soudure. Ces peaux sont assimilables à des fissures, dénommées oxide notches en anglais, et doivent de ce fait être évitées.

La mise à nu de la surface par décapage mécanique (usinage sans lubrifiant ou grattage) ou chimique (bain acide ou alcalin) permet de supprimer les inclusions d'alumine. Pour être efficace, le décapage doit être effectué peu de temps avant l'opération de soudage, immédiatement avant soudage pour obtenir un niveau de qualité élevé.

### 2.1.4 *Fissuration à chaud*

La fissuration à chaud concerne certains alliages trempants. On distingue la fissuration à chaud, en cours de solidification, qui affecte uniquement le métal fondu et la fissuration se produisant dans le métal de base en fin de solidification.

La fissuration en cours de solidification dans le métal fondu est due à la ségrégation d'éléments d'addition dans les espaces interdendritiques, aux joints de grains. La ségrégation est responsable de la formation de liquides de composition eutectique à bas point de fusion, susceptibles de se séparer sous l'effet des contraintes de solidification (contraction volumique du bain de fusion de l'ordre de 5% en cours de solidification) et des contraintes de bridage dues à la géométrie et à l'épaisseur des pièces. La sensibilité à la fissuration dépend du pourcentage des éléments d'addition. Pour chaque alliage, il existe un domaine de composition où la sensibilité est maximale. La fissuration en fin de solidification dans le métal de base se produit en limite de Zone Affectée Thermiquement (ZAT). Elle résulte de la formation de films liquides intergranulaires par suite de liquation de phases déjà en place ou formées par diffusion d'éléments au cours du chauffage de l'alliage.

La fissuration à chaud est évitée en jouant sur la configuration de soudage (limitation du bridage), sur les paramètres de soudage et en employant, lorsque cela est possible, un métal d'apport adapté.

L'énergie de soudage doit être de préférence faible pour limiter la grosseur de grain et avoir un volume de bain réduit qui minimise les contraintes de retrait. L'emploi d'un métal d'apport de nuance différente du métal de base diminue fortement la sensibilité à la fissuration par un effet de dilution. Les métaux d'apport séries 4xxx et 5xxx sont, par exemple, employés pour le soudage des séries 6xxx et 7xxx. Les métaux d'apport 4xxx présentent une très bonne soudabilité opératoire, leurs propriétés mécaniques (ténacité et allongement à la rupture) sont en revanche faibles. Les métaux d'apport 5xxx ont de meilleures propriétés mécaniques mais sont moins tolérants vis-à-vis de la fissuration du fait d'une température de fusion plus élevée qui génère un risque de liquation (brûlure). Pour les alliages non trempant (ne présentant pas de risque de fissuration à chaud) les métaux d'apport employés sont identiques aux métaux de base.

## 2.2 Procédés de soudage utilisés au CERN

### 2.2.1 TIG

La couche d'alumine est un isolant électrique qui s'oppose à l'établissement de l'arc de soudage en courant continu polarité directe (flux d'électrons de l'électrode vers la pièce à souder). L'utilisation de la polarité inverse permet de pallier à ce problème. La couche d'alumine est alors « cassée » par le flux d'électrons allant du métal de base vers l'électrode. Cependant, la polarité inverse a 2 inconvénients majeurs, elle provoque la dégradation rapide de l'électrode par un bombardement électronique continu de celle-ci et génère une faible pénétration du bain de fusion. L'utilisation d'un courant alternatif permet de bénéficier de l'effet de décapage de la couche d'alumine en polarité inverse et d'assurer la pénétration en polarité directe tout en évitant la détérioration de l'électrode. Le rapport décapage/pénétration est réglable sur les équipements modernes. Un courant à haute tension peut être superposé pour faciliter le réamorçage de l'arc à chaque alternance. Le décapage de la couche d'alumine n'est pas obligatoire en courant alternatif, il est cependant nécessaire pour obtenir un niveau de qualité élevé.

La couche d'alumine doit impérativement être décapée pour le soudage en courant continu polarité directe.

Comparativement au procédé MIG, le soudage TIG offre une solidification lente qui d'une part favorise le dégazage de l'hydrogène (limitation de la formation de soufflures) et d'autre part minimise les risques de manques de fusion.

#### Exemples d'applications au CERN

- Soudage TIG orbital de jonctions bimétalliques aluminium/inox aux extrémités des circuits de thermalisation hélium des End Cap Toroides d'ATLAS (figure 2). Métaux de base 5083/6061, métal d'apport 4043. Soudage en courant continu pulsé avec gaz de protection 100% hélium. Distance électrode/bain de fusion maintenue constante par un système de contrôle automatique de la hauteur d'arc (Arc Voltage Control). Dégraissage des composants et décapage mécanique des surfaces mises en fusion immédiatement avant soudage. Contrôle de la qualité des soudures à 100% par radiographie X avec un niveau de qualité requis B « exigence élevée » selon ISO 10042.

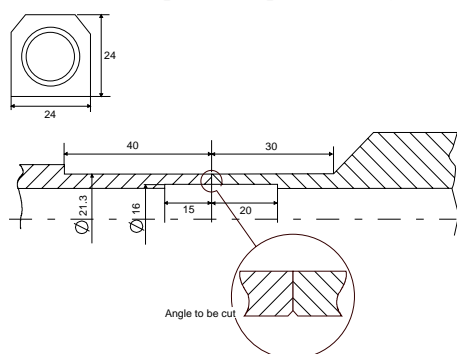
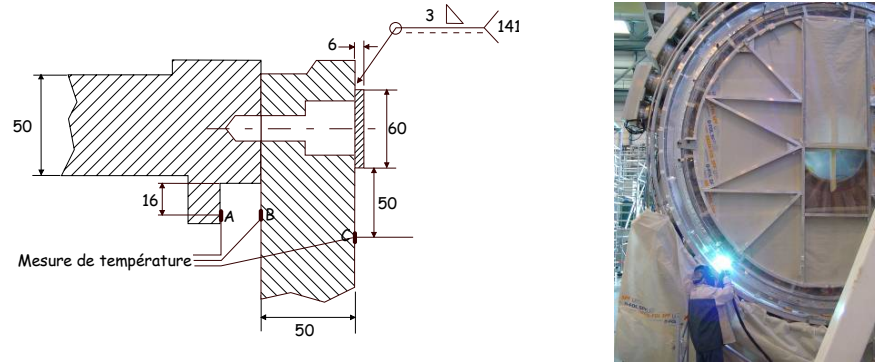


Figure 2 : Soudage TIG orbital de jonctions bimétalliques aluminium/inox

- Soudage TIG manuel des bandes d'étanchéité sur les couvercles des cryostats Barrel et End Cap du calorimètre argon ATLAS (figure 3). Métal de base 5083, métal d'apport 5356. Soudage en courant alternatif pulsé avec gaz de protection 70% hélium / 30% argon. Dégraissage des composants et décapage mécanique des surface mise en fusion immédiatement avant soudage. Test de fuite pour valider l'étanchéité des soudures.



**Figure 3 : soudage TIG manuel de bandes d'étanchéité sur couvercles cryostats ATLAS**

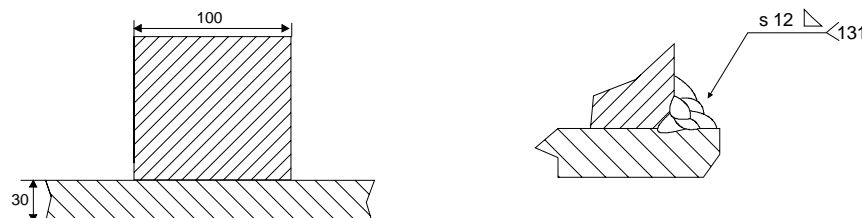
### 2.2.2 MIG

En comparaison avec le soudage TIG, le soudage MIG se caractérise par un cycle thermique court qui accroît le risque de manque de fusion et augmente la sensibilité à la formation de soufflures (la rapidité du refroidissement laisse peut de temps au dégazage de l'hydrogène). L'emploi d'hélium dans le gaz de protection limite ces risques. L'arc est cependant moins stable avec l'emploi d'hélium. Un compromis entre le pourcentage Ar/He permet d'optimiser entre vitesse de soudage et stabilité de l'arc. En général 50% He avec un maximum de 70% et un minimum de 30% (au dessous, l'effet n'est plus sensible). Tout autre gaz a une influence néfaste sur le soudage de l'aluminium.

Le soudage en courant pulsé<sup>5</sup> est recommandé pour obtenir un transfert stable du métal fondu dans l'arc. A pénétration de soudure équivalente, le courant pulsé permet d'abaisser l'énergie moyenne de soudage et offre ainsi la possibilité de souder les faibles épaisseurs.

#### Exemples d'applications au CERN

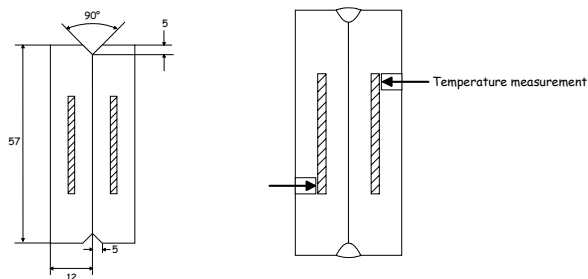
- Soudage MIG manuel de supports de levage sur les End Cap Toroides d'ATLAS (figure 4). Métaux de base 5083, métal d'apport 5183. Soudage en courant pulsé avec gaz de protection 70% hélium / 30% argon. Dégraissage des composants et décapage mécanique des surface mise en fusion immédiatement avant soudage. Préchauffage à 120°C avant soudage. Niveau de qualité requis B «exigence élevée» selon ISO 10042.



**Figure 4 : soudage MIG manuel de supports de levage**

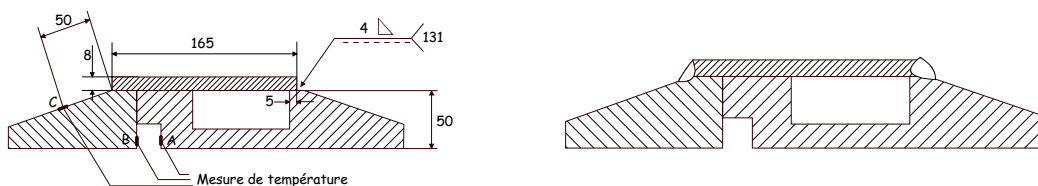
<sup>5</sup> mode de transfert par pulvérisation axiale avec détachement régulier de gouttes de petit diamètre

- Soudage MIG manuel des busbars supraconducteur d'ATLAS. Métal de base aluminium pur, métal d'apport Al99.99% (figure 5). Soudage en courant pulsé avec gaz de protection argon. Dégraissage des composants et décapage mécanique des surface mise en fusion immédiatement avant soudage. Développement de la procédure de soudage pour ne pas dépasser la température de 180°C au niveau du câble supraconducteur en cours de soudage.



**Figure 5 : soudage MIG manuel de busbars supraconducteurs**

- Soudage MIG manuel des bandes d'étanchéité sur les couvercles des cryostats Barrel et End Cap du calorimètre argon ATLAS (figure 6). Métal de base 5083, métal d'apport 5183. Soudage en courant pulsé avec gaz de protection 70% hélium / 30% argon. Dégraissage des composants et décapage mécanique des surface mise en fusion immédiatement avant soudage. Développement de la procédure de soudage pour ne pas dépasser la température de 80°C au niveau du joint indium en cours de soudage.



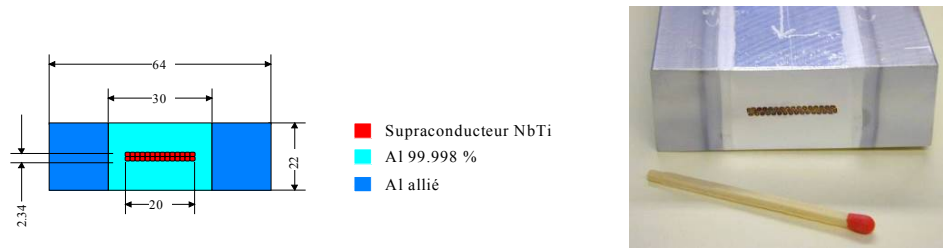
**Figure 6 : soudage MIG manuel de bandes d'étanchéité sur couvercles cryostats ATLAS**

### 2.2.3 Faisceau d'électrons (FE)

Le soudage FE se caractérise par une densité d'énergie très élevée. Il permet d'obtenir une ZAT très réduite et des cordons de soudure à bords parallèles limitant fortement la déformation des assemblages. Les conditions très favorables du soudage FE (faible volume de bain, solidification à grains fins, faible retrait) permettent de souder des alliages difficilement soudables en soudage à l'arc tels que, par exemple, le 2219 ou le 6061. L'emploi de métal d'apport étant difficile (mise en place d'inserts), les alliages à durcissement structural ne sont soudables que dans certaines limites d'épaisseur et pour les alliages les moins alliés de composition chimique éloignée de la sensibilité maximale à la fissuration à chaud. Bien que le vide favorise la désorption de l'humidité et le dégazage du bain, le cycle thermique extrêmement court ne permet pas le dégazage de l'hydrogène. Il est donc impératif de soigner la préparation des pièces avant soudage pour éviter la formation de soufflures.

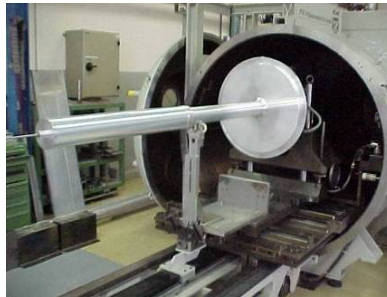
#### Exemples d'applications au CERN

- Le soudage FE a été appliqué pour le soudage des renforts sur le câble supraconducteur CMS (figure 7). Grâce à un cycle thermique court, le FE a permis de réaliser des cordons de soudure à proximité immédiate du câble NbTi sans altération de celui-ci.



**Figure 7 : soudage FE de renforts sur câble supraconducteur CMS**

- Soudage FE corne CNGS. Ce procédé a été choisi pour minimiser les déformations et garantir une rectitude élevée sur une pièce de plusieurs mètres de long présentant de nombreuses soudures.



**Figure 8 : soudage FE de la corne CNGS**

#### 2.2.4 Laser

Le rendement énergétique du soudage laser est faible en raison de la réflectivité importante de l'aluminium (de l'ordre de 80%). De même qu'en soudage à l'arc, la protection par argon endroit (et envers en soudage débouchant) est nécessaire pour limiter la formation de soufflures. Les considérations sur la soudabilité des alliages par faisceau laser sont identiques à celles formulées pour le soudage FE. Il est à noter que l'emploi de métal d'apport est possible.

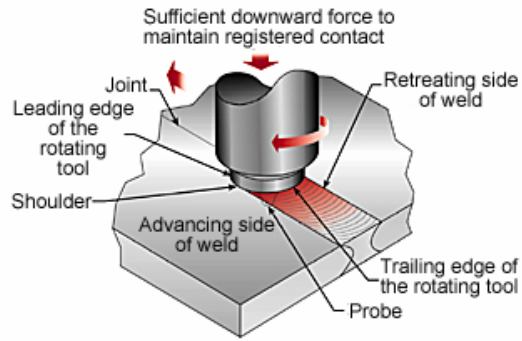
La puissance du laser YAG possédée par le CERN étant faible, cet équipement est peu utilisé pour le soudage des alliages d'aluminium.

### 2.3 Une nouvelle technologie : le Friction Stir Welding (FSW)

#### 2.3.1 Description du procédé FSW

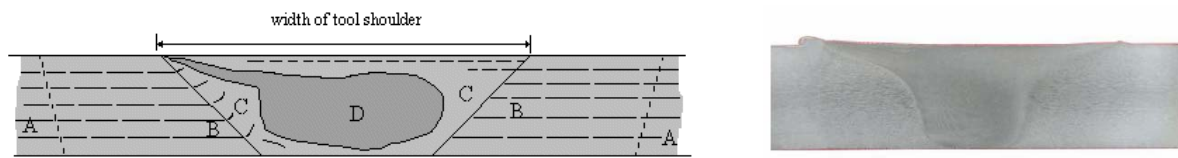
Le FSW est un procédé de soudage récent mis au point par TWI (The Welding Institut UK) en 1991. Ce procédé reprend le principe du soudage par friction qu'il applique aux assemblages bout à bout linéaires de grande dimension. La liaison est obtenue en phase pâteuse sans fusion des métaux de base par un effet de friction malaxage généré par la mise en rotation d'un outillage dans le plan de joint. Le FSW requiert un outillage de maintien latéral des pièces et un outillage de support (enclume) permettant de soutenir les tôles en réaction à la force verticale exercée par l'outil (figure 9). Les épaisseurs maximales soudables sont actuellement de l'ordre de 30 mm en une passe, 60 mm en deux passes (une passe endroit, une passe envers).





**Figure 9 : principe du FSW**

La forme des cordons de soudure dite en « oignon » est caractéristique du procédé FSW (figure 10).

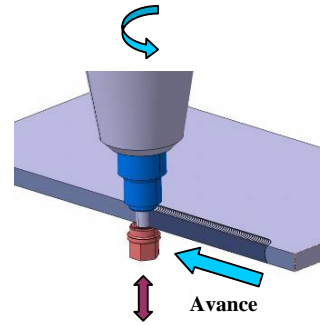
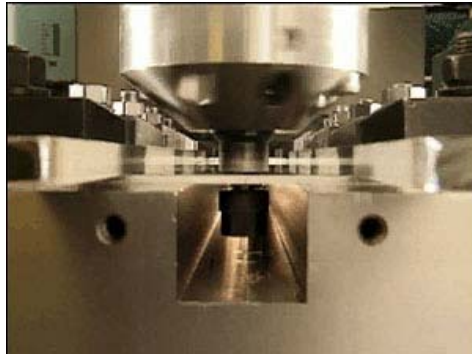


**Figure 10 : coupe schématique d'un cordon de soudure FSW**

A : Métal de base non affecté, B : ZAT : Zone affectée Thermiquement, C : TMAZ : Zone Affectée Thermo Mécaniquement (déformation plastique avec zone de recristallisation), D : Noyau : recristallisation dynamique.

Cette technologie de soudage « à l'état solide » possède, de par sa nature, de nombreux atouts. Le procédé est écologique car il ne génère pas de fumées et ne nécessite pas de matériaux d'apport (gaz, métal...). Purement mécanique, il est tolérant vis à vis de l'accostage des pièces à souder. Opérant en phase pâteuse, il n'y a pas de fusion de la matière : les déformations sont faibles, et les problèmes rencontrés lors du soudage par les procédés traditionnels (soufflures, fissuration à chaud, inclusion) sont considérablement diminués, voire complètement éliminés. Le FSW permet ainsi d'assembler des matériaux réputés difficilement soudables par soudage traditionnel (alliages d'aluminium des séries 7xxx, 2xxx, ...). D'autre part, comme les températures atteintes restent inférieures au point de fusion, les caractéristiques mécaniques de l'assemblage final sont élevées et dans la plupart des cas, supérieures à celles obtenues avec des procédés de soudage traditionnels.

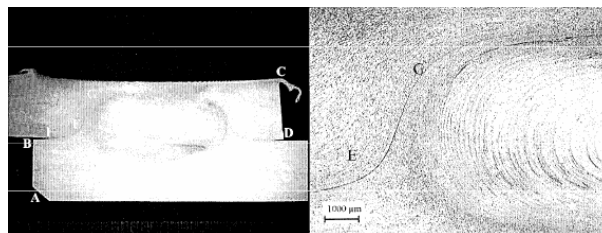
Les limites du FSW sont liées à la durée de vie de l'outil, à la nécessité de mettre en oeuvre des outillages onéreux pour le maintien ferme pièces à assembler et au trou laissé en fin de cordon par l'outil. Ces difficultés sont en passe d'être résolues par les développements récents. Une nouvelle génération d'outils nommés « bobbin tools » ou « self reacting tools » permet de supprimer l'outillage de support (enclume) parfois complexe du fait d'une accessibilité envers réduite ou de la géométrie de pièces (figure 11). Ces outils présentent un double épaulement permettant de pincer les pièces à assembler et ainsi de se dispenser d'un outillage de support. Le pasassemblage des pièces par un encastrement ou un pointage permet également de se dispenser de l'enclume.



**Figure 11 : outil à double épaulement type « bobbin tool »**

La fermeture du trou en fin de soudure peut quant à elle être résolue par l'emploi d'outils rétractables ou en terminant la soudure sur un talon éliminé ultérieurement par une opération d'usinage.

Les paramètres de soudage doivent être maîtrisés pour éviter la formation de défauts spécifiques au FSW que sont les cavités allongées, les manques de pénétration et les « crochets » également appelés « hook flow ». Les cavités allongées se présentent sous forme de défauts continus sur la totalité de la soudure. Elles sont dues à un mauvais paramétrage de la vitesse de rotation de l'outil et de la vitesse d'avance qui entraînent un malaxage incorrect associé à un refroidissement trop rapide de la soudure. Ces défauts sont facilement détectables par contrôle non destructif (par exemple par radiographie) et peuvent aisément être supprimés par un paramétrage adapté. Les manques de pénétration sont dus à une pénétration insuffisante de l'outil dans le plan de joint due à une variation locale des épaisseurs à assembler. Ce défaut peut être évité en utilisant un contrôle de l'outil en effort plutôt qu'en position. Alors que le contrôle de l'outil en position est fortement dépendant des variations d'épaisseur, le contrôle de l'outil en effort vertical permet d'obtenir la liaison sur la totalité de l'épaisseur malgré de petites fluctuations d'épaisseur. Les manques de pénétration en FSW sont difficilement détectables, l'effort de forgeage durant le soudage ayant tendance à les refermer. Les « crochets » sont liés aux soudures par transparence. Ils prennent naissance dans l'interface des tôles à assembler et se présentent sous forme de fines inclusions d'oxydes très difficiles à détecter par contrôle non destructif (figure 12). Ils ont pour origine une mauvaise fragmentation de la couche d'alumine par l'outil. Un travail sur les paramètres de soudage ou la suppression de la couche d'alumine permet de les éliminer.



**Figure 12 : Crochets**

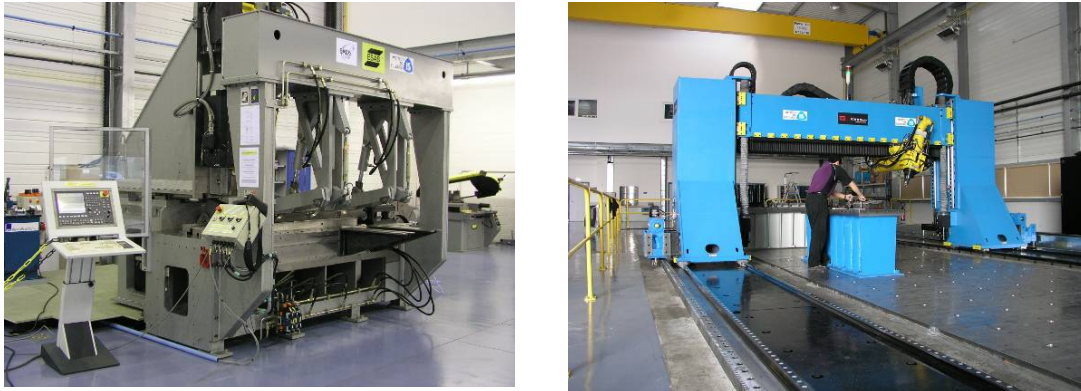
L'élimination de la couche d'alumine avant soudage n'est, en général, pas requise. Elle est cependant nécessaire pour les applications haute technologie (aéronautique par exemple).

Signalons enfin que le FSW connaît de nouvelles applications dans le soudage des aciers, aciers inoxydables, bases nickel, cuivre et alliages cuivreux et des assemblages hétérogènes tels que aluminium/cuivre, aluminium/inox.

### 2.3.2 Exemples d'applications

▪ Industrie Aéronautique: soudage de tôles en remplacement du rivetage pour les ailes, le fuselage, soudage de réservoirs cryogéniques, réservoirs de kérosène, corps de missiles. Construction navale: pont, plate-forme d'atterrissage d'hélicoptères, mât et bôme, coque de bateaux. Transport ferroviaire: planchers de voitures, corps de container. Automobile: raboutage de tôles, réservoir d'essence, carter de moteur électrique, jantes etc.

Un centre Institut de Soudure (IS) exclusivement dédié à cette nouvelle technologie de soudage FSW a été créé sur le site de l'aéroport de Metz-Nancy-Lorraine, et est opérationnel depuis début 2004 (figure 13). Ces équipements sont accessibles aux adhérents de l'IS dont fait partie le CERN.



**Figure 13 : équipement de soudage FSW de l'Institut de Soudure (Metz)**

### REFERENCES

- [1] L'aluminium et ses alliages (Christian Boucher- IS)
- [2] The inspection of friction stir welded aluminium plant (C R Bird-TWI)