



Soudage de l'aluminium par friction malaxage (FSW)

Maurice Duval

11 janvier 2018

SOUDAGE DE L'ALUMINIUM PAR FRICTION MALAXAGE (FSW)

Auteur : Maurice Duval

1. Introduction

Le soudage des métaux par friction consiste à produire une forte pression et un frottement intense entre deux surfaces à assembler. L'élévation de température produite par la friction entraîne un ramollissement du métal qui, par la pression, est partiellement chassé du joint en brisant et entraînant la fine couche d'oxyde présente sur les surfaces. Ce sont la haute température et l'expulsion des oxydes qui garantissent ce soudage sans fusion [13]. Les conditions requises sont similaires au soudage du fer par forgeage, déjà connu il y a 4000 ans, où le bris des oxydes entre les surfaces assure un contact intime métal-métal qui se soude [15], dans ce cas vers 1000°C. C'est ce même mécanisme qui assure la cohésion du métal dans le procédé de soudage par friction malaxage (Friction Stir Welding, FSW) où on utilise un outil rotatif qui produit la friction et malaxe le métal tout en pulvérisant les films d'oxydes dans l'interface à assembler.

Le soudage par friction malaxage repose sur une invention dont le premier brevet a été déposé en 1991 par The Welding Institute (TWI). Cette technologie (voir brevet US 5,460,317) s'appuie aujourd'hui sur de nombreuses années de recherche. C'est l'utilisation de l'outil rotatif non consommable qui confère toute sa flexibilité au procédé, en particulier pour l'aluminium.

2. Principe du procédé

La figure 1 montre un joint bout à bout à réaliser entre 2 plaques d'aluminium. Les deux parties de l'assemblage doivent être accolées et bien retenues (système de bridage) sur un support afin de contrer les forces générées par l'outil rotatif. Cet outil de forme cylindrique possède un épaulement qui par frottement sur les plaques génère la chaleur et confine en comprimant la zone à souder. Il est prolongé par un pion dont la longueur est adaptée à l'épaisseur des plaques afin de plonger dans le métal jusqu'au plus près du support pour une soudure « pleine pénétration ». La géométrie du pion, en général de forme tronconique, a pour rôle de malaxer efficacement le métal dans le joint (morcellement et bonne répartition des oxydes de surface dans la zone soudée) en générant un minimum d'effort à l'avance de l'outil. On démarre le soudage à la vitesse d'avance lorsque l'épaulement en rotation contre la surface a permis, en quelques secondes, d'atteindre la température optimale de soudage. Elle se situe normalement entre 80% et 90% de la température de fusion du métal à souder. À cette température le métal reste solide, mais se déforme facilement. On comprend donc qu'un outil en acier rapide (high speed steel) qui conserve sa dureté jusque vers 900°C offre une excellente résistance en soudage par friction malaxage des alliages

d'aluminium dont la température de fusion ne dépasse pas 660°C. La vitesse d'avance optimale, influencée par plusieurs paramètres dont la vitesse de rotation et la géométrie de l'outil, est obtenue par des essais de qualification sur les composantes à assembler. Cette vitesse peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres par minutes dépendamment des paramètres d'opération optimaux pour le joint à souder.

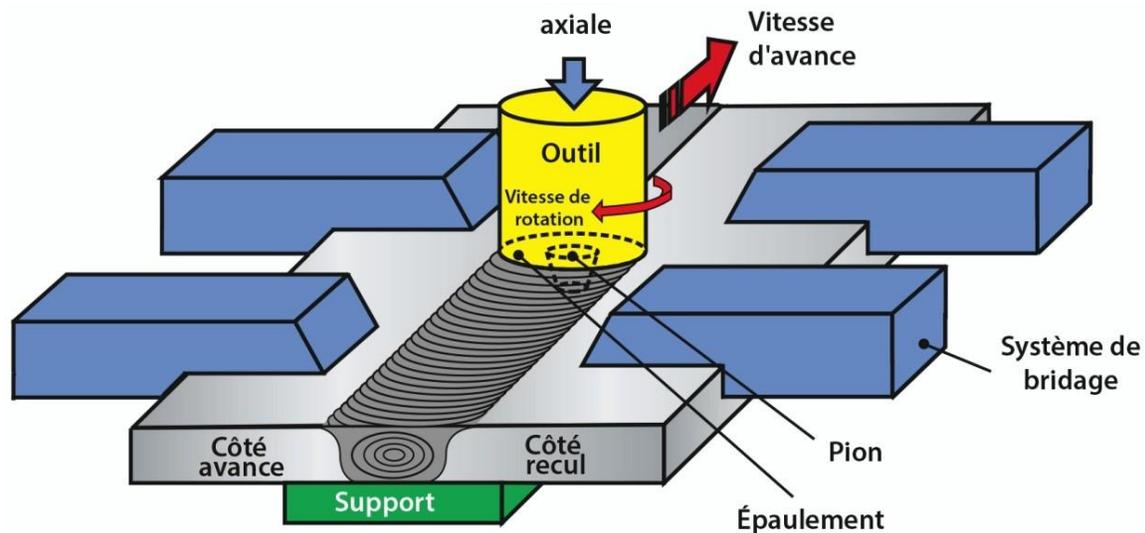


Figure 1. Schéma montrant les principales composantes de l'outillage en soudage par friction malaxage (FSW)

La soudure obtenue par friction malaxage est réalisée, avec l'outil en rotation (entre 400 et 1200 rpm), en quatre phases distinctes dont chacune a un rôle précis. La figure 2 illustre ces quatre phases, soit :

- 1. Phase de plongée :** le pion de l'outil en rotation pénètre dans le joint jusqu'à ce que l'épaulement exerce la force de compression requise pour générer la chaleur.
- 2. Phase d'attente ou de stabilisation :** elle correspond au temps requis pour que le frottement produit par l'épaulement chauffe le joint à la température requise.
- 3. Phase d'avance ou de soudage proprement dit :** l'outil décolle à vitesse constante le long du joint en exerçant une pression constante sur la surface.
- 4. Phase de retrait de l'outil :** l'outil arrête d'avancer et se retire de la surface.

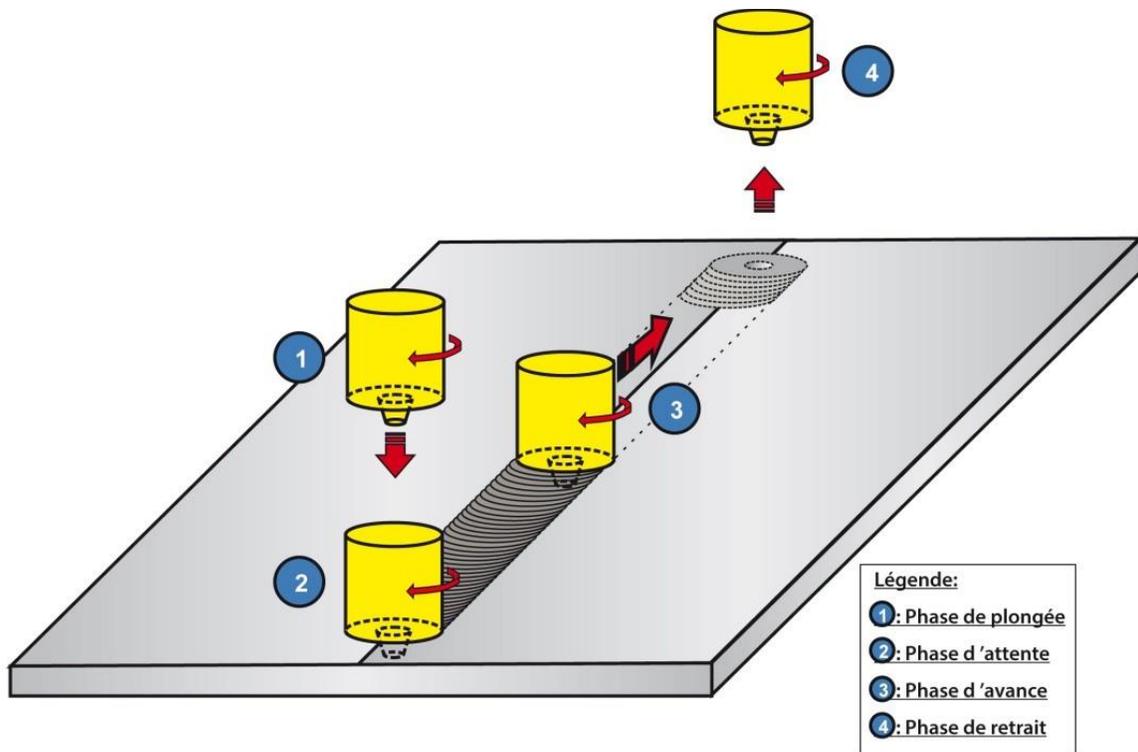


Figure 2. Illustration des phases de soudage [1]

La figure 3 montre les variations de la force axiale et du couple appliqué sur l'outil au cours de ces phases en fonction de temps. Les valeurs précises de la force et du couple dépendent de la géométrie de l'outil, de celle du joint à souder, des alliages et des paramètres de soudage.

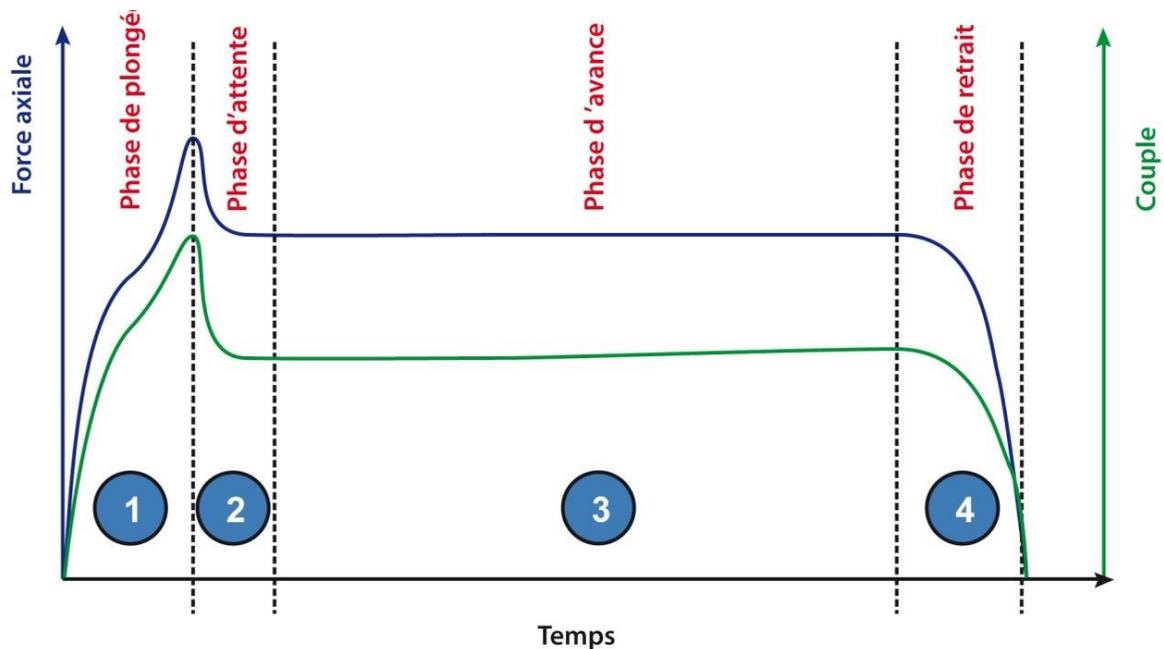


Figure 3. Variations de la force axiale et du couple durant les phases de soudage [1]

Par rapport à l'usinage, les forces et les couples sont relativement élevés. Bien que comparativement à l'usinage les vitesses de rotation soient faibles ($< 5\,000$ rpm), le couple peut atteindre 150 Nm . La force axiale (aussi appelée force de forgeage) requise pour produire la chaleur par frottement peut atteindre 25 kN . La force longitudinale qui s'oppose à l'avance de l'outil peut atteindre quant à elle plusieurs kN. À titre d'exemple, les forces maximales en jeu pour le soudage d'une plaque de 6.35 mm ($1/4$ pouce) en 6061-T6 sont de 20 kN pour la force axiale, 5 kN pour la force longitudinale et 0.5 kN pour la force transverse tandis que le couple peut atteindre 150 newton-mètre . Ces valeurs, typiques pour le 6061-T6, vont varier en plus ou en moins selon la dureté de l'alliage.

Le trou produit dans la phase de plongée se déplace avec le mouvement d'avance du pion ; la matière en arrière du pion étant remplacée par celle en avant grâce au malaxage du métal. Ce trou produit par le pion est cependant laissé dans le joint lors du retrait de l'outil (figure 4). Pour l'éliminer de la pièce à assembler, on peut prévoir sur l'assemblage une longueur excédentaire ou une pièce rapportée au bout du joint qui devra ensuite être coupé. On fait de même pour éliminer le défaut qui sera produit si on démarre le soudage au début du joint.

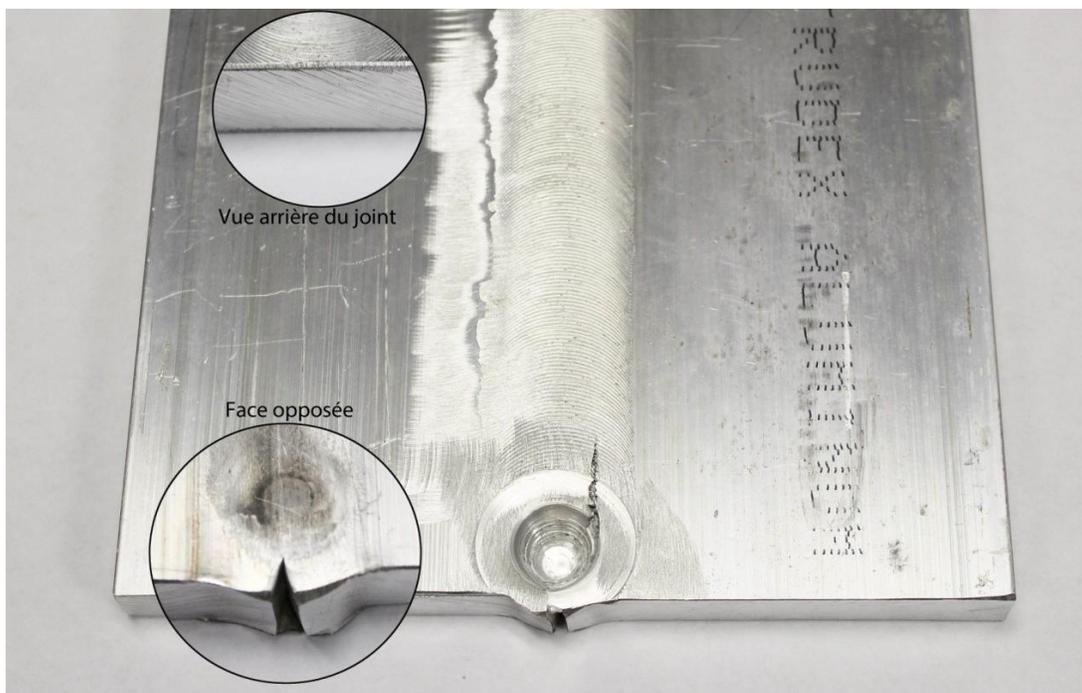


Figure 4. Échantillon de plaque de 12.7 mm ($1/2$ pouce) soudée en une seule passe

L'épaulement en frottant sur la surface pour générer l'échauffement du métal produit également une légère dépression avec des stries et des bavures périphériques le long de la ligne de contact. Le développement des outils a conduit à diverses géométries de surface pour l'épaulement qui ont pour objectif de minimiser ces défauts de surface au niveau du joint.

On peut voir à la figure 5 diverses configurations d'assemblages que l'on peut souder par friction malaxage. Ces configurations doivent avoir des géométries qui permettent d'assurer un support suffisant pour les forces en jeu et une surface adéquate pour le contact avec l'épaulement de l'outil.

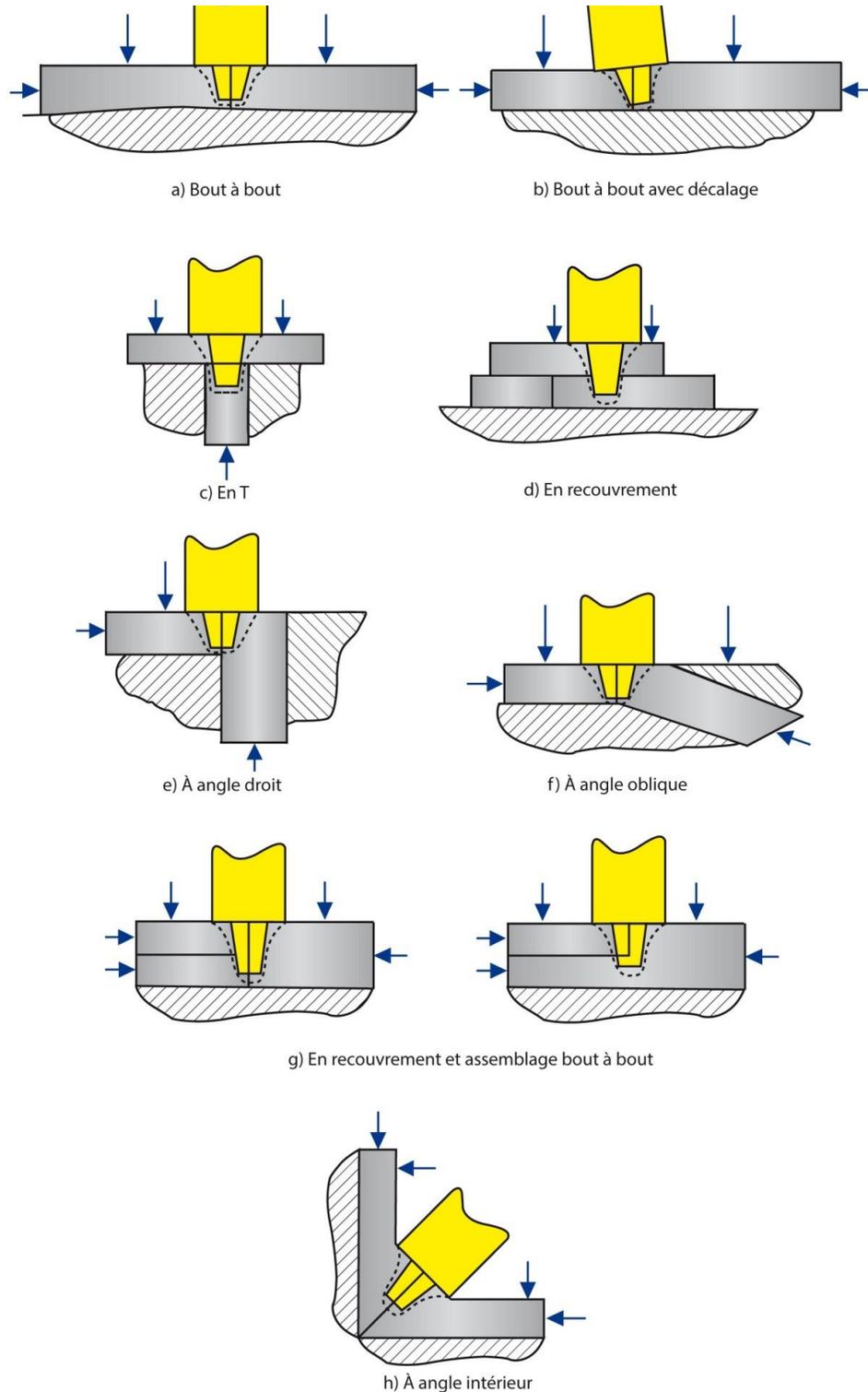


Figure 5. Configurations d'assemblage montrant le positionnement de l'outil et les forces de maintien des pièces [1]

Le soudage par friction malaxage présente des avantages indéniables pour le soudage de l'aluminium en ce qui a trait à la distorsion comparativement au soudage par fusion d'avantage affecté par le retrait au refroidissement du cordon de soudage. De plus, ce procédé fonctionne très bien pour des nuances d'alliage d'aluminium difficilement soudables comme les alliages corroyés des séries 2000 et 7000 et certains alliages de fonderie. Il s'agit d'un procédé fiable et répétitif lorsque les paramètres d'opération sont bien qualifiés. On peut souder de fortes épaisseurs sans métal d'apport en une seule passe. Le tableau 1 présente les avantages par comparaison aux procédés de soudage par fusion et les limitations du procédé.

Tableau 1 – Avantages et limitations du soudage par friction malaxage (FSW) pour l'aluminium [1]

AVANTAGES COMPARATIFS
Absence de porosité et de soufflure
Absence de fissuration de solidification
Absence de projection
Absence de fumée
Aucun rayonnement UV émis
Aucun gaz de protection requis pour l'aluminium
Procédé silencieux
Distorsions et retraits réduits
Meilleures propriétés mécaniques des assemblages (tension, flexion, fatigue)
Absence d'arc électrique (équipement de protection réduit)
Possibilité de soudage dans différentes positions

AVANTAGES COMPARATIFS

Haute efficacité énergétique

Outil non consommable ayant une bonne durée de vie

Aucun métal d'apport et de flux requis

Procédé tolérant un jeu entre les pièces et une faible présence d'oxyde sur les faces à joindre

Préparation avant soudage réduite

Possibilité de souder des pièces en aluminium ayant une épaisseur > 50 mm en une seule opération

Possibilité de souder la plupart des alliages, des alliages dissimilaires et des alliages d'aluminium avec d'autres métaux

Gain en productivité

Limitations

Limitations à des géométries plutôt simples, avec une surface relativement plane dans la zone soudée

Utilisation requise d'un système de maintien des pièces

Présence nécessaire d'un support sous les pièces à souder (sauf si on utilise un outil à double épaulement)

Les départs et les fins de soudage présentent un défaut qui doit être géré

Encombrement de la tête de soudage qui peut limiter l'accès à certains endroits

3. Équipements

Le soudage en friction malaxage peut être réalisé avec divers types d'équipement. On doit être en mesure de tenir l'outil dans un mandrin, d'assurer la rotation à la vitesse requise, de produire une force axiale de frottement et de confinement suffisante, de produire le mouvement de translation à la vitesse requise le long du joint, de supporter et fixer solidement les éléments à souder.

La composante de base est la tête de soudage avec son mandrin pour tenir l'outil et assurer sa rotation dans la plage des vitesses d'opération. Elle peut être dotée de systèmes pour mieux contrôler le procédé (suivi, forces, couple, etc.). La tête de soudage peut être installée sur deux types d'équipement dédiés au soudage qui assurent les fonctions d'orientation de la tête et son déplacement, soit le portique de soudage et le robot de soudage.

La figure 6 montre l'équipement de type portique du CSFM-UQAC ayant les caractéristiques suivantes : Épaisseur maximale de 15 mm soudable en une seule opération pour l'alliage 6061-T6; Longueur soudable de 18 m; Largeur soudable de 3.5 m; Dégagement en hauteur de 1m; Vitesse maximale possible 6 m/min; Précision de position moins de 0.16 mm.



Figure 6. Équipement de soudage conçu pour le FSW [voir 12 pour informations]

La figure 7 montre un robot doté d'un système d'asservissement en position développé par le CNRC pour compenser le manque de rigidité d'un robot pour le soudage en friction malaxage, ce qui augmente la précision de positionnement et de trajectoire de l'outil. L'entreprise Soudure J.M. Tremblay de Saint-Anicet offre un service de soudage par friction malaxage avec ce type d'équipement.

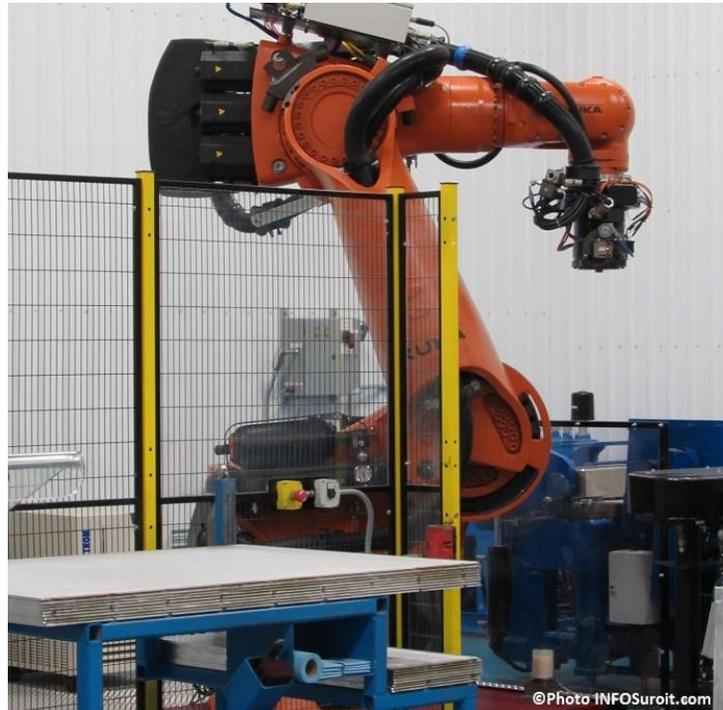


Figure 7. Robot asservi pour le FSW doté de sa tête de soudage [19]

Il est possible dans certains cas d'utiliser des fraiseuses universelles à commande numérique pour piloter l'outil de soudage. Si on dispose d'une fraiseuse et qu'on veut l'utiliser pour cet usage, il faut s'assurer que les forces de soudage ne dépassent pas la capacité de l'équipement qui n'est pas au départ conçu pour ce travail. Des développements ont été faits au Québec sur les outils pour rendre la technologie fonctionnelle à partir d'une fraiseuse [20].

De nombreuses techniques de fixation peuvent être utilisées pour fixer les pièces. Les forces à contraindre vont dépendre en bonne partie des épaisseurs à souder et les systèmes de fixation doivent être le plus versatiles possible pour s'adapter aux dimensions des pièces et à la géométrie des soudures. Le système de bridage illustré à la figure 1 doit résister aux forces qui tendent à écartier et déplacer les pièces à assembler. On peut voir à la figure 4 l'importance de ces forces capables de déformer le métal à l'avant du pion et causer une déchirure du joint à l'arrière. Bien que l'épaulement de l'outil exerce une force axiale pour garder le joint en appui sur le support, c'est le système de bridage qui doit assurer cette fonction. Ce type de bridage peut être semblable à celui utilisé en usinage comme on peut voir à la figure 9. Pour des soudages répétitifs des systèmes automatisés de bridage pneumatique ou hydraulique vont diminuer le temps d'opération donc le coût pour la fixation des pièces. Pour cette raison

dans le soudage d'une pièce produite en série, il est généralement requis de développer un système spécifique de fixation pour la pièce comme pour la production de jantes combinant deux technologies (Cobapress et fluotournage) avec un assemblage par friction malaxage [21].

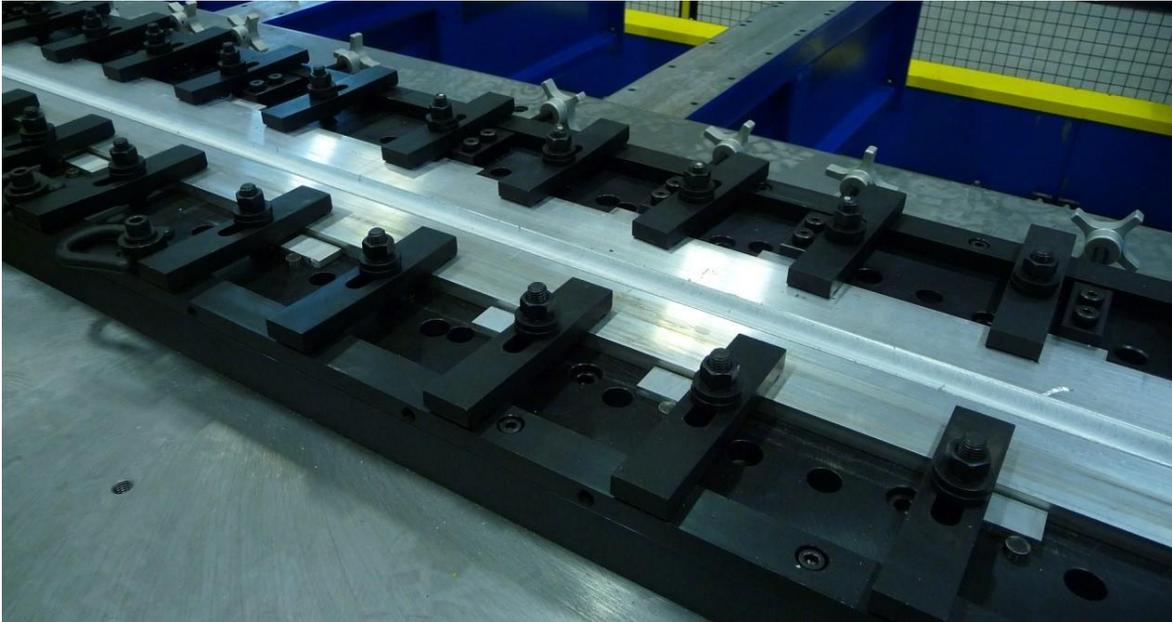


Figure 8. Bridage mécanique de base [1]

De nombreuses variantes de ce procédé de soudage ont été développées ou sont en développement. Aussi on retrouve une diversité d'équipements spécialisés pour réaliser des soudures répondant à des besoins spécifiques : soudure par point; soudure simultanée sur 2 faces; soudure avec épaulement stationnaire; soudure avec métal d'apport; fabrication additive [1].

4. Défauts rencontrés dans les soudures

On observe plusieurs types de défauts propres au soudage par friction malaxage. Ces défauts sont dimensionnels ou parfois internes dû à une mauvaise répartition du métal et des oxydes présents à la surface du joint. Le FSW engendre aussi des distorsions et des contraintes résiduelles, mais à un niveau nettement moindre que le soudage par fusion.

Les défauts rencontrés ont des causes multiples essentiellement reliées à de mauvais paramètres de soudage tel que : Mauvaises vitesses d'avance et de rotation; Mauvais choix d'outil; Force axiale mal ajustée ou contrôlée; Pièces mal retenues. On peut voir à la figure 9a la microstructure d'un joint soudé où on distingue les différentes zones : Malaxée (ZM); Affectée thermo-mécaniquement (ZATM); Affectée thermiquement (ZAT); Métal de base (MB). C'est dans la ZM

qu'on peut retrouver des alignements d'oxydes préjudiciables aux propriétés mécaniques. La figure 9b montre la position des différents types de défauts en friction malaxage. Cependant lorsque les paramètres de soudage préalablement qualifiés sont bien contrôlés le procédé est très fiable et répétitif, ces défauts ne vont donc pas apparaître.

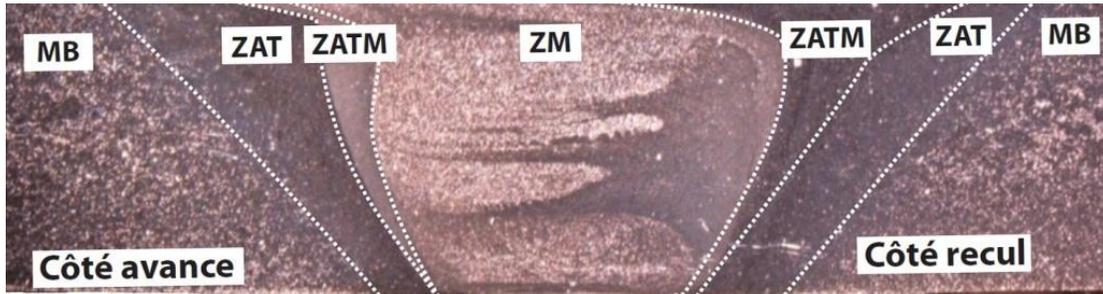


Figure 9. a) Vue en coupe de la microstructure d'un joint soudé

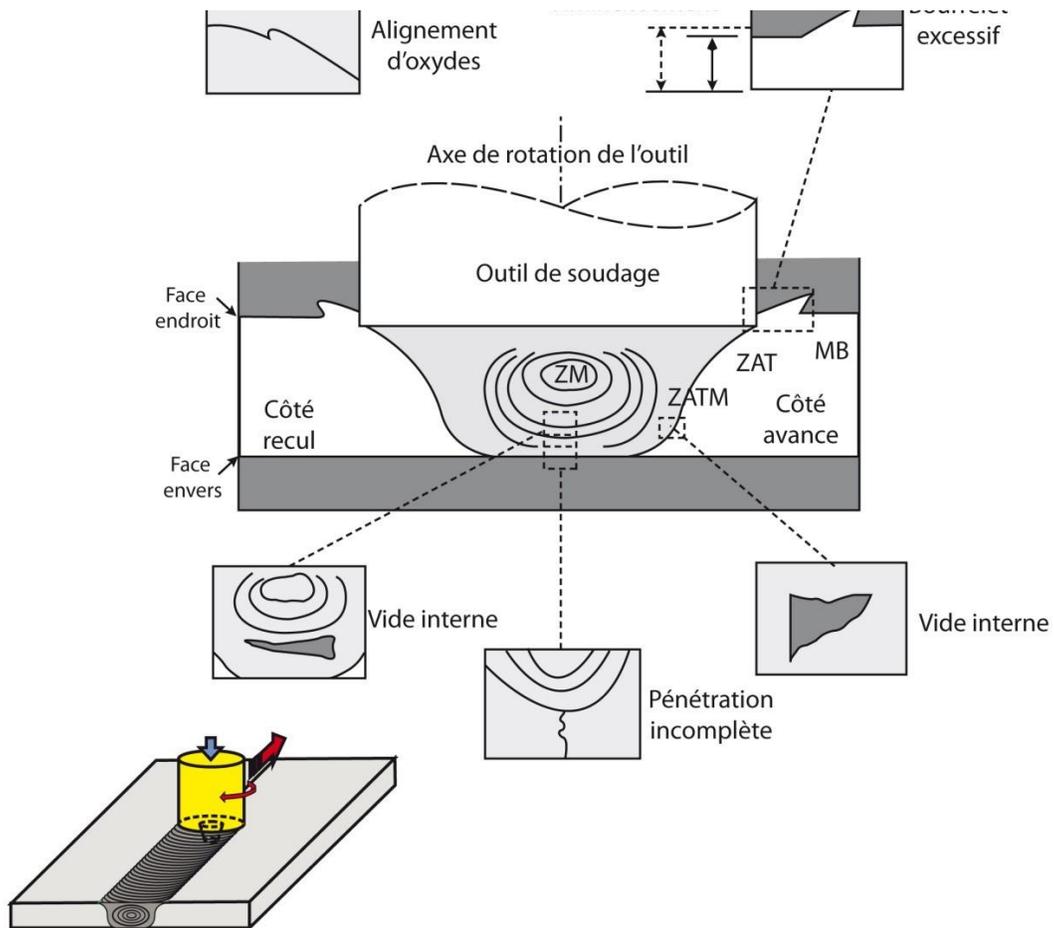


Figure 9. b) Schéma montrant la position des défauts en soudage FSW en soudure bout à bout. [1]

Les normes ISO 25 239 et AWS D17.3/D17.3M (2010) définissent les directives et exigences en soudage par friction malaxage pour les alliages d'aluminium. La dernière concerne les applications aérospatiales. Les éléments clés à contrôler pour assurer la qualité d'un assemblage sont les dispositifs qui concernent la fixation de l'assemblage, la propreté du joint (pas de contaminant à part l'oxyde naturel), les outils de soudage et les paramètres de soudage (vitesse de rotation, force axiale, vitesse d'avance).

Les méthodes d'inspection (visuelle, liquide pénétrant, ultrasons, rayons X, courant de Foucault) développées pour l'inspection des joints en soudage par fusion, sont adaptables pour le soudage en friction malaxage.

5. Soudage des alliages d'aluminium

La composition chimique d'un alliage et son état métallurgique obtenu par traitement thermique et/ou déformation à froid lui confère ses propriétés mécaniques. Cet état métallurgique est altéré par l'élévation de la température dans la zone soudée. Il en résulte une diminution locale des propriétés du métal de base dans la zone soudée (la zone affectée thermiquement, la ZAT). Le soudage par friction malaxage étant réalisé à des températures plus basses que celles produites en soudage par fusion (MIG, TIG), les propriétés du métal dans la ZAT sont moins affectées. Lorsqu'on soumet un joint soudé à un essai de traction la déformation se concentre dans cette zone et la résistance en traction est toujours inférieure à celle du métal de base, sauf pour l'état recuit –O où les propriétés sont déjà minimales. Les données présentées au tableau 2 montrent que la perte de résistance en traction est nettement moindre en soudage par friction malaxage (FSW) qu'en soudage par fusion. Le coefficient de soudure correspond au degré de maintien des propriétés dans la ZAT.

Tableau 2 - Résistance en traction d'alliages assemblés par FSW et soudage au MIG [6, 22]

Alliage d'aluminium - épaisseur	Résistance en traction, métal de base (MPa)	Résistance en traction, FSW (MPa)	Coefficient de soudure, FSW (%)	Résistance en traction, MIG (MPa)
1100-H16	110	102	93	80
2014-T651 6 mm	479-483	326-338	68-70	290
2024-T351 5 mm	483-493	410-434	83-90	290

Alliage d'aluminium - épaisseur	Résistance en traction, métal de base (MPa)	Résistance en traction, FSW (MPa)	Coefficient de soudure, FSW (%)	Résistance en traction, MIG (MPa)
2219-T87	475.8	310.3	65	283
2195-T8	593	406.8	69	-
5083-O 6 à 15 mm	285-298	217-344	67-79	296
6061-T6 5 mm	319-324	217-252	67-79	207
7050-T7451 6.4mm	545-558	427-441	77-81	-
7075-T7351	472.3	455.1	96	-
7075-T651 6.4mm	622	468	75	275
6065-T78 6 mm	332	247	74	-
5005-H14 3 mm	158	118	75	-
7020-T6 5 mm	385	325	84	-
6063-T5 4 mm	216	155	72	117
2024-T3 4 mm	478	425-441	89-90	-
7475-T76	-	465	92	-

Alliage d'aluminium - épaisseur	Résistance en traction, métal de base (MPa)	Résistance en traction, FSW (MPa)	Coefficient de soudure, FSW (%)	Résistance en traction, MIG (MPa)
6013-T6 4 mm	394-398	295-322	75-81	-
6013-T4 4 mm	320	323	94	-
2519-T87 25.4mm	480	379	79	-

Les problèmes rencontrés (soufflures, fissuration) en soudage par fusion pour le soudage des alliages de fonderie sont complètement évités en FSW. De plus la zone soudée montre, par l'effet du malaxage, des propriétés améliorées par rapport au métal de base.

Le soudage entre deux alliages d'aluminium différents ne présente normalement pas de difficulté. Le tableau 3 montre les propriétés mécaniques de plaques de 2.5 mm d'épaisseur en **2024-T6** et **7075-T6** soudées par FSW par comparaison aux propriétés des alliages de base. Dans ce type d'assemblage, la rupture se produit dans la ZAT du côté de l'alliage le moins résistant.

Tableau 3 : Propriétés mécaniques d'une soudure réalisée entre les alliages d'aluminium 2024 et 7075, comparées à celle des matériaux de base [2]

Alliage d'aluminium	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Élongation à la rupture (%)
2024	380	490	17
7075	503	572	11
Assemblage pas FSW 2024-7075	325	424	6

6. Exemples d'applications industrielles du procédé

Le soudage par friction malaxage a été identifié rapidement comme une technique avantageuse pour le soudage de l'aluminium. Le tableau 4 présente par ordre chronologique les premières percées importantes dans l'assemblage par friction malaxage de l'aluminium.

Tableau 4 : Applications majeures du FSW [3]

Année	Application	Entreprise, pays
1995	Échangeur de chaleur à paroi creuse*	Marine Aluminium, Norvège
1996	Construction navale commerciale*	Marine Aluminium, Norvège
1998	Fusée Delta II	Boeing, États-Unis
1999	Construction navale commerciale*	SAPA, Suède
2000	Composantes automobiles*	SAPA, Suède
2000	Boîtier de système laser	General Tool, États-Unis
2001	Boîtier de moteur*	Hydro Aluminium (auparavant Marine Aluminium), Norvège
2001	Composantes automobiles*	Showa, Japon
2001	Structure de train*	Hitachi, Japon

Année	Application	Entreprise, pays
2002	Composantes automobiles*	Tower Automotive, États-Unis
2003	Structure d'avion	Eclipse, États-Unis
2003	Construction navale commerciale*	Advanced Joining Technologies, États-Unis
2004	Réservoir externe pour navette spatiale	Lockheed Martin, États-Unis
2004	Panneau alimentaire	RIFTEC, Allemagne

**Applications pour lesquelles des profilés extrudés sont soudés.*

La combinaison de ce procédé d'assemblage avec le potentiel de l'aluminium pour la production d'**extrusion** offre un avantage important dans la conception de produits. On retrouve l'assemblage par friction malaxage dans tous les secteurs de l'industrie : **naval, aéronautique et aérospatiale, ferroviaire, automobile.**

Centre de soudage par friction-malaxage

Université du Québec à Chicoutimi

555, boulevard de l'Université
Chicoutimi (Québec) G7H 2B1
418 545-5011, poste 5308
cee-ugac@uqac.ca

Soudures J. M. Tremblay Inc.

1303, 132^e Rue
Saint-Anicet (Québec) J0S 1M0
450 264-5690

Références

- [1] Le soudage par friction malaxage : principes et applications, Lyne St-Georges, éd. : Les Presses de l'aluminium, Chicoutimi, Québec (2015).
- [2] Cavaliere, P., Nobile, R., Panella, F. W., & Squillace, A. (2006). Mechanical and microstructural behaviour of 2024–7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(6), 588-594.
- [3] Colligan, K.J, (2007). Friction Stir Welding for ship construction – Enables Prefabricated, Stiffened Panels with Low Distortion, Concurrent Technologies Corporation, p.1-6.
- [4] Colwell, K.C. (2013). Tow Metals Enter, One leaves: *the miracle of friction stir welding*, *Car and Driver*, May 2013, <http://www.caranddriver.com/features/two-metals-enter-one-metal-leaves-the-miracle-of-friction-stir-welding-tech-dept>
- [5] Hilgert, J. (2012). *Knowledge based process development of bobbin tool friction stir welding* (Doctoral dissertation, Technische Universität Hamburg).
- [6] Mishra, R. S., & Ma, Z. Y. (2005). Friction stir welding and processing. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 50(1), 1-78.
- [7] Kim, Y. G., Fujii, H., Tsumura, T., Komazaki, T., & Nakata, K. (2006). Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 415(1), 250-254.
- [8] Lim, S., Kim, S., Lee, C. G., & Kim, S. (2004). Tensile behavior of friction-stir-welded A356-T6/Al 6061-T651 bi-alloy plate. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 35(9), 2837-2843.
- [9] Liu, H. J., Fujii, H., & Nogi, K. (2004). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints of AC4A cast aluminium alloy. *Materials Science and Technology*, 20(3), 399-402.
- [10] Thomas, W. M., Kallee, S. W., Staines, D. G., & Oakley, P. J. (2006). *Friction stir welding—process variants and developments in the automotive industry*(No. 2006-01-0555). SAE Technical Paper.
- [11] Smith, C. B., Hinrichs, J. F., & Ruehl, P. C. (2000). *Friction Stir and Friction Stir Spot Welding—Lean, Mean and Green*. Society of Manufacturing Engineers.
- [12] FSW au CFMS-
UQAC https://www.youtube.com/watch?v=XeZ_v12YPE&t=32s
- [13] Soudage par friction <https://www.youtube.com/watch?v=03FioPzhEBM>

- [14] FSW au CRIQ <https://www.youtube.com/watch?v=aNbQH8XBgxQ>
- [15] Bienvenu Y., Assemblage par diffusion (soudage ou brasage), Techniques de l'ingénieur (2010)
- [16] Sandra Zimmer-Chevret, Claude Guyomard, Laurent Langlois, Régis Bigot, Patrick Martin. FSW : UN PROCEDE DE SOUDAGE POUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE. 11 ième Colloque National AIP PRIMECA La Plagne, Apr 2009, France. 10p., 2009. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01073753/document>
- [17] https://tel.archives-ouvertes.fr/pastel-00766216/file/prA_sentation_nejah.pdf
- [18] <http://constellation.uqac.ca/2541/1/030333805.pdf>
- [19] <https://www.infosuroit.com/soudures-j-m-tremblay-lance-une-nouvelle-technologie/>
- [20] Imani Y., Guillot M., Tremblay A., Optimisation of FSW tool design and operating parameters for butt welding of AA6061-T6 at right angle, Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress 2014. <https://www.gmc.ulaval.ca/departement-et-professeurs/professeurs-et-personnel/professeurs/fiche/show/quillot-michel/>
- [21] Procédé Cobawheels, <http://www.sjwheels.com/fr/cobawheels.html#friction-stir-welding> https://www.youtube.com/watch?v=BTqZqnZ2nY8&list=PLT_nQA5BeCzX9-fiV4hR-vtZmW2SIxqZW&index=1
- [22] Welding, Keiser Aluminum, Second Edition