



### **Science Arts & Métiers (SAM)**

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: <https://sam.ensam.eu>  
Handle ID: <http://hdl.handle.net/10985/8717>

#### **To cite this version :**

Sandra ZIMMER-CHEVRET, Julien LAYE, Claude GUYOMARD, Patrick MARTIN, Laurent LANGLOIS - FSW : UN PROCÉDE DE SOUDAGE POUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE - In: 11<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA La Plagne, France, 2009-04-22 - 11<sup>ème</sup> Colloque National AIP PRIMECA - 2009

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

Administrator : [scienceouverte@ensam.eu](mailto:scienceouverte@ensam.eu)



## **FSW : UN PROCEDE DE SOUDAGE POUR LES ALLIAGES D'ALUMINIUM DE FONDERIE**

**Sandra Zimmer (1), Julien Laye (2), Claude Guyomard (1), Laurent Langlois (1),  
Régis Bigot (1), Patrick Martin (1)**

(1) LCFC, Arts et Métiers ParisTech CER de Metz, 4 rue Augustin Fresnel, 57070 Metz

(2) Institut de Soudure, Z.A. Aéroport de Metz, 2-4 rue Pilâtre de Rozier, 57420 GOIN

### **Résumé :**

*L'étude présentée concerne la réalisation d'un démonstrateur mettant en évidence le potentiel du procédé de soudage par friction malaxage ( FSW) pour la reconception et la réalisation de pièce en alliages d'aluminium de fonderie. Le potentiel du FSW vient en grande partie du fait que la matière n'atteint pas la fusion lors de l'élaboration de la soudure. Ceci permet notamment de souder des alliages sensibles à la fissuration à chaud et de réaliser des assemblages hétérogènes. La reconception du produit doit tenir compte des contraintes du FSW. Ces dernières ont été identifiées et correspondent à la nécessité de contenir la matière lors du malaxage. Ceci se traduit par une contrainte d'accessibilité de l'outil à la soudure, de celle d'une enclume à l'envers de la soudure et à la présence de matière en épaisseur suffisante autour du pion. Une autre contrainte vient des efforts générés lors du soudage. Les géométries conçues doivent permettre la réalisation d'un montage de soudage supportant les efforts de soudage. L'étude particulière de l'une des soudures du démonstrateur a permis de mettre en évidence la relative tolérance du FSW au défaut de mise en position des pièces à souder et de suivi de trajectoire.*

**Mots clefs : Soudage par friction malaxage, alliage d'aluminium de fonderie, reconception, montage de soudage**

### **1. Introduction :**

Le soudage par friction malaxage, également appelé « Friction Stir Welding » (FSW) est un procédé breveté, développé par « The Welding Institute (UK) » [1]. Le principe de ce procédé est de réaliser une soudure de proche en proche en malaxant localement la matière des deux pièces à assembler. La soudure est obtenue par l'action d'un outil dont les rôles sont de chauffer et malaxer le matériau [2].

La liaison métallurgique est obtenue à chaud mais en dessous de la température de fusion des matériaux. Le FSW est donc un procédé de soudage à l'état solide [2]. Comme la plupart de ces procédés (soudage par friction, soudage par explosion...), le FSW a deux avantages essentiels :

- il ne génère pas de soufflure ni de fissure à chaud
- il permet de réaliser des soudures hétérogènes.

Ceci fait du FSW un procédé d'assemblage de choix pour certaines nuances d'alliage d'aluminium comme les alliages corroyés des séries 2000 et 7000 ou les alliages d'aluminium de fonderie.

Cet article est consacré à la réalisation d'une pièce de démonstration dont le but est de mettre en évidence le potentiel du FSW en terme de simplification et d'optimisation de la fabrication de pièces de fonderie.

## 2. Procédé de soudage par friction malaxage : principe et aspects opératoires

Le FSW est un procédé de soudage de proche en proche où la liaison métallurgique est obtenue par malaxage local de la matière (voir figure 1) [2]. Le malaxage et l'échauffement de la matière sont produits par un outil s'apparentant à une fraise d'usinage. Ce dernier est constitué d'un pion et d'un épaulement. Le pion sert essentiellement au malaxage de la matière. L'épaulement quant à lui sert à apporter de la chaleur par frottement et à contenir la matière malaxée autour du pion. Il est nécessaire dans la plupart des cas d'apposer à l'envers de la soudure une enclume pour reprendre les efforts de soudage et soutenir la matière malaxée.

La matière des pièces à assembler est échauffée par frottement et déformation plastique jusqu'à une température de l'ordre de grandeur de celle atteinte en forgeage à chaud. Il n'y a pas fusion de la matière. Par rapport aux procédés classiques de soudage par fusion, cela permet d'éviter la formation de soufflure et/ou de fissure à chaud [2]. Pour les alliages de la série 2000 (AlCu) et 7000 (AlZn) cela représente un avantage certain.

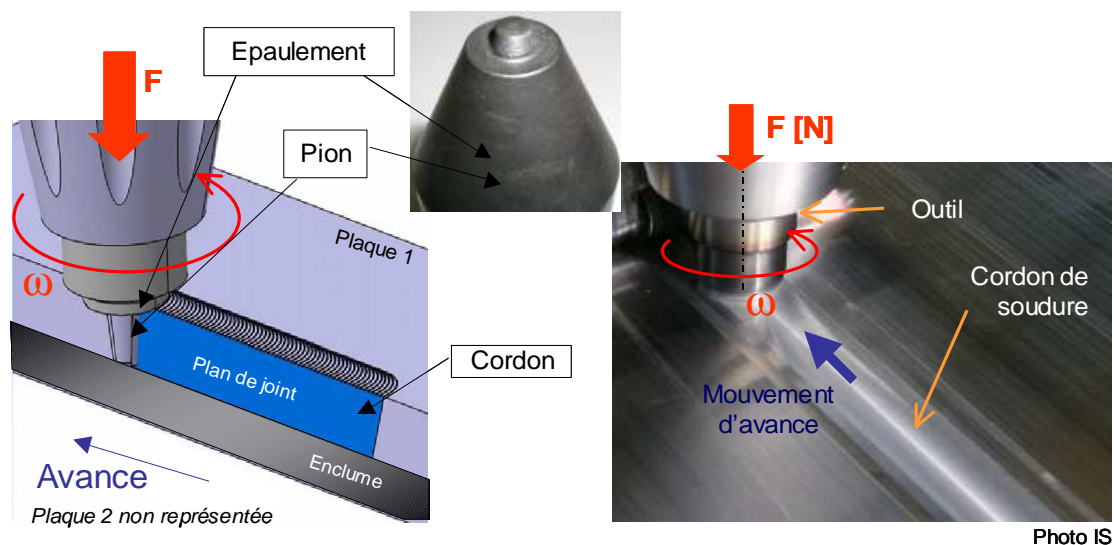


Figure 1 : Principe du soudage par friction malaxage

L'opération de soudage par FSW se décompose en plusieurs phases :

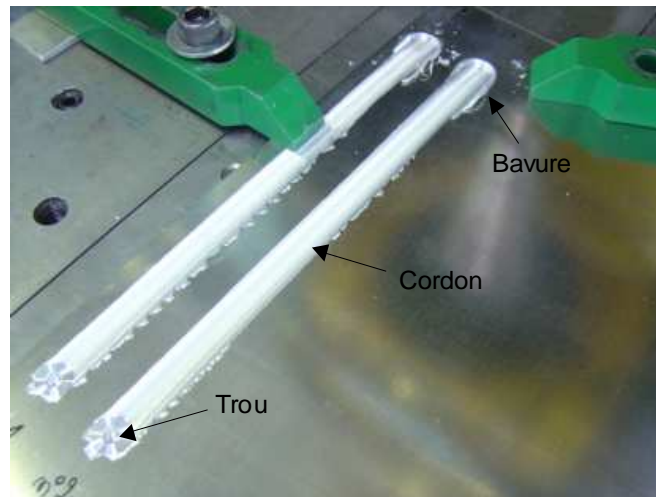
- la plongée durant laquelle l'outil est inséré progressivement dans le joint,
- la phase de soudage,
- le retrait de l'outil.

Les paramètres de pilotage du procédé FSW sont, lors de la phase de soudage, la vitesse de rotation de l'outil, la vitesse d'avance et l'effort exercé sur l'outil suivant son axe (appelé effort de forgeage) [3]. La valeur à donner à ces paramètres est fonction du matériau, de l'épaisseur à souder et de la géométrie de l'outil. L'outil peut être piloté suivant son axe en contrôle de position ou contrôle d'effort. Dans ce dernier cas, la position de l'outil résulte de l'équilibre entre l'effort de forgeage et la

réaction de la matière soudée. Ce mode de pilotage permet de s'adapter au défaut d'accostage et de mise en position des pièces à assembler [4].

La figure 2 montre une soudure réalisée en pleine tôle (alliage 6082 T651 épaisseur 6mm). Sur cette figure, nous pouvons remarquer :

- un trou en fin de soudure laissé par l'outil lors de son retrait,
- une « bavure » en début de soudure correspondant à la matière rejetée lors de la plongée.



*Figure 2 : photographie de deux cordons réalisés en pleine tôle, alliage 6082T651 6mm*

Il existe trois technologies d'outils (voir figure 3) [5].

- l'outil « conventionnel » comportant un épaulement et un pion fixe
- l'outil à pion rétractable. Le retrait du pion se fait progressivement dans l'épaulement et permet d'obtenir des soudures sans trou en fin de cordon mais également de souder des pièces avec une profondeur de pénétration variable.
- l'outil avec double épaulement comportant deux épaulements et un pion. L'enclume est supprimée et la matière est pincée entre les deux épaulements. Ce type d'outil permet de souder les pièces pour lesquelles il n'est pas possible de placer une enclume à l'envers de la soudure.

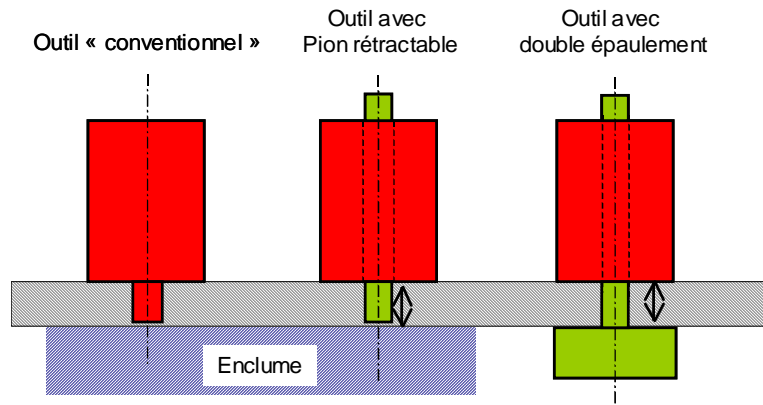


Figure 3 : Technologies d'outils de FSW [5]

La soudure obtenue comporte plusieurs zones caractéristiques (voir la macrographie de la figure 4) que sont [2]:

- un noyau où le matériau est malaxé. C'est le cœur de la soudure où les taux de déformation et les températures sont les plus élevés.
- une zone affectée thermomécaniquement (ZATM) encadrant le noyau. La matière y subit une élévation de température combinée à une déformation plastique (d'amplitude plus faible que dans le noyau).
- une zone affectée thermiquement (ZAT) où la matière ne subit qu'une montée en température par conduction de la chaleur depuis les deux premières zones.
- le matériau de base (MB) dont les propriétés restent inchangées.

Interface des deux plaques  
avant soudage

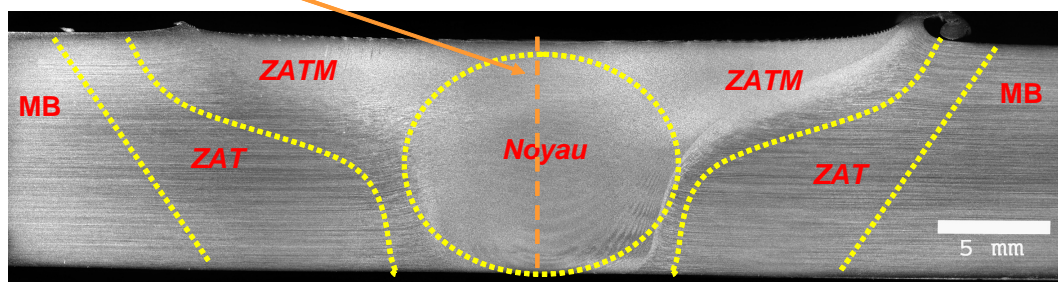


Figure 4 : Macrographie d'une soudure FSW d'un alliage d'aluminium [5]

L'action mécanique de l'outil sur la pièce est importante. L'énergie de soudage est purement mécanique et correspond essentiellement au travail du couple. Les efforts importants appliqués par l'outil sur les pièces à souder nécessitent l'utilisation de systèmes de mise et maintien en position [3].

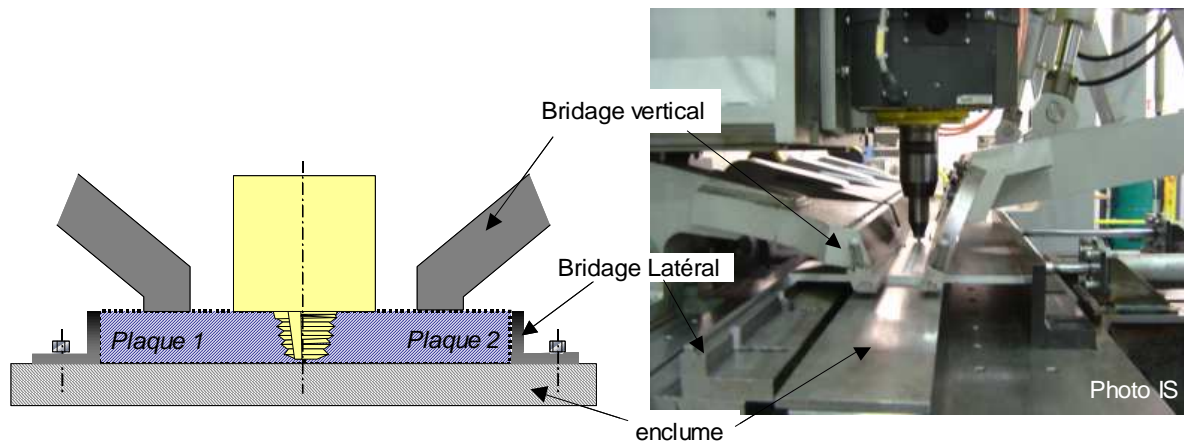


Figure 5 : Système de bridage en soudage FSW

### 3. Démonstrateur

La pièce servant de démonstrateur est décrite sur la figure ci-dessous. Elle est constituée de 4 sous-pièces à assembler.

La forme et les matériaux constitutifs de cette pièce ont été choisis pour présenter différentes configurations de soudage caractéristiques et révélatrices du potentiel du procédé FSW. Le tableau 1 donne le détail de chacune de ces configurations.

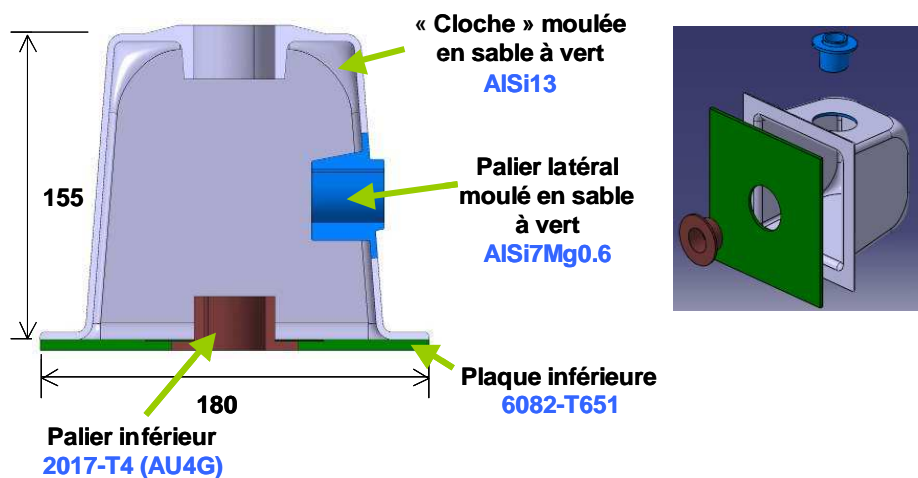


Figure 6 : Schéma du démonstrateur

Sous pièce		matériau 1	matériau 2	configuration
Cloche	palier latéral	AlSi13 moulé	AlSi7Mg0.6 moulé	bout à bout circulaire
Cloche	Plaquette inférieure	AlSi13 moulé	6082 T651 Corroyé	par recouvrement circulaire
Plaquette inférieure	Palier inférieur	6082 T651 Corroyé	2017 T4 corroyé	bout à bout circulaire

Tableau 1 : matériaux et configurations de soudage

Le démonstrateur a été conçu pour présenter :

- l'assemblage de matériaux de natures et de modes d'élaboration différents

- des configurations géométriques de soudage différentes
- des géométries de pièces comportant des difficultés de réalisation en un seul tenant par les procédés classiques de mise en forme comme la fonderie

La « cloche » et le « palier latéral » sont des pièces obtenues par fonderie au sable à vert. Les deux nuances sont difficilement soudables par les procédés de soudage par fusion. L'obtention en un seul tenant de la cloche et du palier latéral aurait nécessité l'utilisation d'un noyau intérieur et extérieur et aurait imposé l'utilisation d'une seule nuance d'alliage d'aluminium.

L'ensemble formé de la cloche, de la plaque inférieure et du palier inférieur ne peut être obtenu qu'avec l'utilisation d'un noyau intérieur de fort volume. Comme dans le cas précédent, l'emploi de matériaux différents n'aurait pas été possible.

Pour la dernière soudure, le matériau du palier inférieur (2017-T4 ou AU4G) est difficile à souder par les procédés à l'arc du fait de sa sensibilité à la fissuration à chaud.

### 3.1 Gamme de fabrication et choix de la technologie d'outil

L'ordre des opérations de soudage est contraint pour des raisons d'accessibilité à l'envers de la soudure. Pour chaque soudure, selon la technologie d'outil utilisée, il est nécessaire de mettre une enclume à l'envers et d'assurer la mise et le maintien en position des pièces. La figure 7, ci-dessous, donne l'ordre d'exécution des soudures. Pour les soudures circulaires, il est nécessaire d'utiliser un outil avec pion rétractable. Ceci permettra de ne pas laisser de trou en fin de cordon. Pour cette technologie d'outil, l'opération de soudage comporte trois phases principales : la phase de pénétration de l'outil, la phase de soudage et la phase de remontée du pion. La phase de soudage a lieu sur un tour complet pour fermer la soudure, la remontée du pion se fait en repassant sur une partie de la soudure déjà réalisée. Ceci permet de répartir le manque de matière, correspondant au volume du pion, sur une grande longueur de cordon.

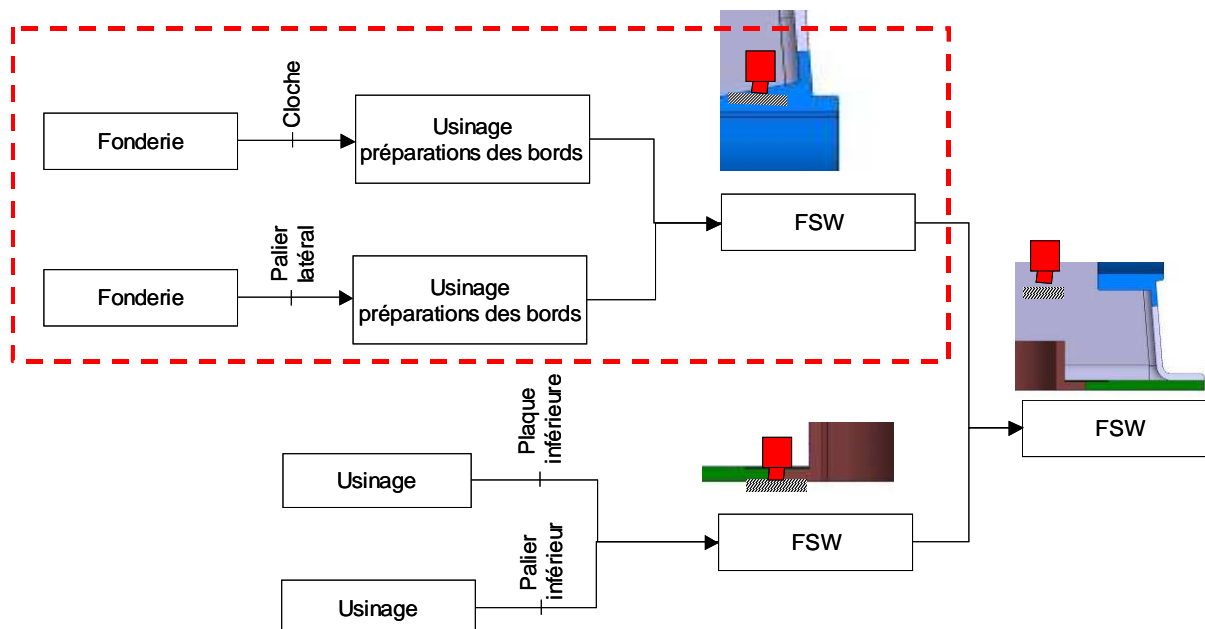


Figure 7 : gamme de fabrication du démonstrateur, ordre des soudures

### 3.2 Assemblage du palier latéral sur la cloche

Dans cette partie, on s'intéresse plus particulièrement à la gamme de fabrication de l'ensemble constitué de la cloche et du palier latéral (partie encadrée en rouge sur la figure 7).

Pour l'opération de soudage FSW, il est nécessaire d'utiliser un montage de soudage assurant à la fois la reprise de l'effort à l'envers de la soudure (enclume) et assurant la mise en position des deux pièces l'une par rapport à l'autre et le tout dans l'espace de la machine de soudage. La trajectoire de l'outil est programmée à partir de la CAO de la pièce. Pour minimiser les écarts entre la trajectoire programmée et la position réelle du joint de soudage, le même montage est utilisé pour le soudage et pour la réalisation de la préparation du bord dans la cloche. Pour cela l'enclume est remplacée par une pièce ayant un diamètre intérieur supérieur et permettant un dégagement de l'outil d'usinage. La mise en position des deux enclumes sur le montage est similaire.

Le procédé de soudage FSW est suffisamment tolérant pour autoriser un jeu entre les pièces à assembler de l'ordre de 10% de l'épaisseur à souder. Dans le cas du soudage du palier latéral, l'épaisseur est de 4 mm. Ceci autorise donc un jeu maximum de 0,4mm, bien au-delà de ce qui est accessible par des moyens d'usinage « classiques ». De même, le procédé de soudage autorise une différence d'épaisseur entre les pièces avant soudage. Ceci est important dans la mesure où l'opération de fonderie peut amener une légère dispersion sur les épaisseurs en fonction notamment de la dispersion liée à la mise en position relative des moules. De même, le procédé accepte un certain décalage entre l'axe de l'outil et l'axe du joint de soudure. Ceci est dû au fait que l'outil malaxe la matière sur une certaine largeur liée à la largeur du pion (voir zone « noyau » sur la figure 4). Les défauts tolérés par le FSW sont représentés sur la figure 8.

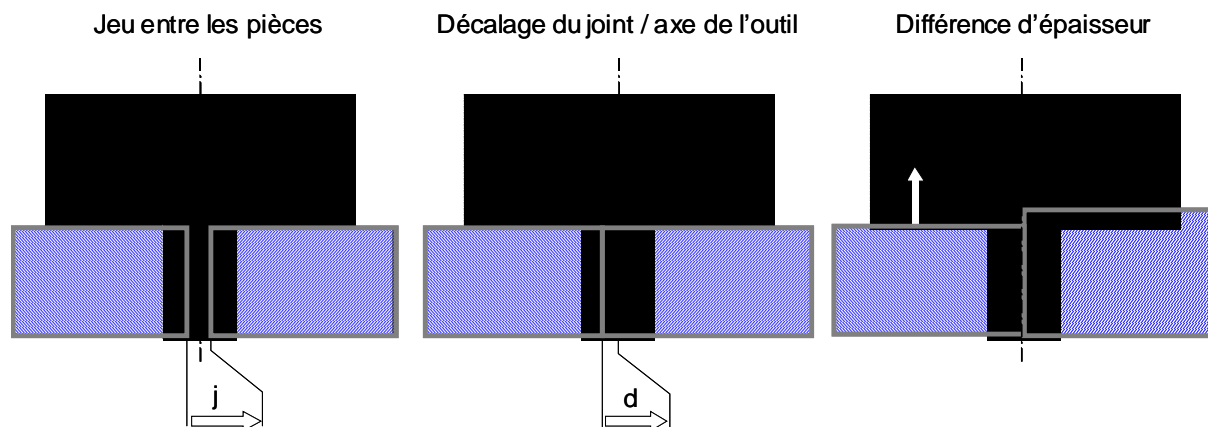


Figure 8 : défaut de préparation des pièces et défaut de suivi de trajectoire

La cloche est mise en position en premier sur le montage. Le palier est ensuite placé en appui sur l'enclume et centré dans la préparation de bord de la cloche (Voir figure 9).



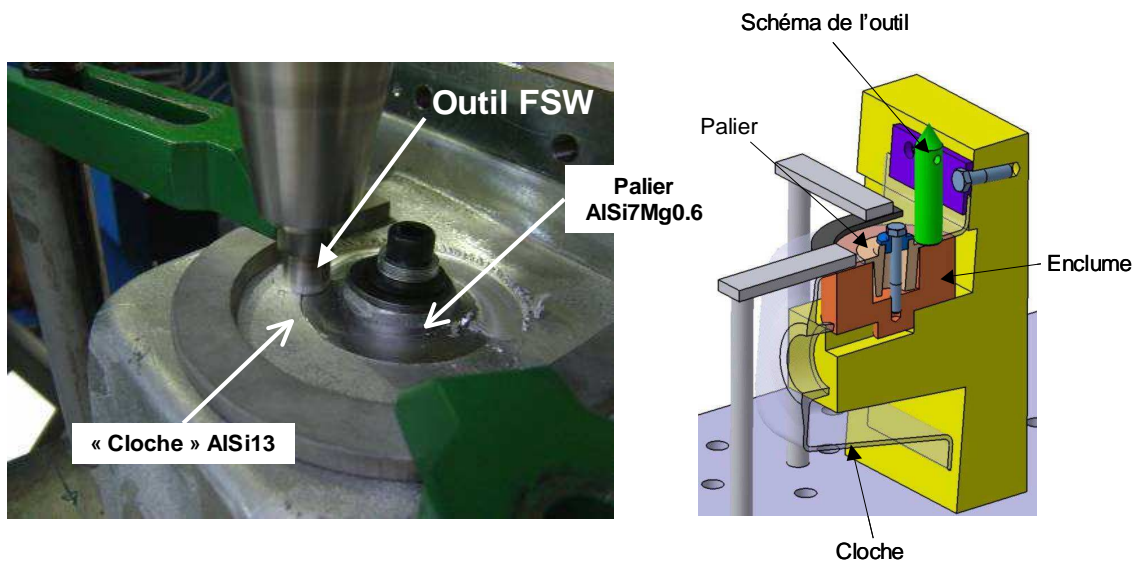


Figure 9: montage pour le soudage du palier latéral sur la cloche.

Le bridage des pièces est constitué d'un ensemble « fer à cheval » - brides plaquant la cloche sur l'enclume, d'une vis et d'une rotule pour le serrage du palier latéral. La cloche est également bridée sur le support d'enclume pour bloquer la translation éventuelle de l'enclume dans sa rainure.

Le montage de soudage et le bridage doivent être dimensionnés pour tenir aux efforts de soudage. Cette démarche est similaire à celle employée en usinage pour la conception des montages d'usinage.

### 3.3 Paramètres de soudage

Alliage	Vitesse de soudage (mm/min)	Vitesse de rotation (tr/min)	Effort de forgeage (kN)
AlSi7Mg0.6/AlSi13	600	900	8
AlSi13/6082	400	900	9
6082/2017	280	400	13

Tableau 2 : paramètres de soudage pour chaque soudure

Les paramètres de soudage sont déterminés sur des éprouvettes de forme simple (soudure rectiligne) mais avec les mêmes matériaux, les mêmes épaisseurs et les mêmes configurations de soudage. En plus des paramètres de soudage, certaines machines permettent de mesurer les efforts dans le sens de l'avance et dans le sens transversal. Dans le cas où ces derniers ne sont pas mesurés, on peut estimer leur maximum à environ 20% de la valeur de l'effort de forgeage [3]. Les paramètres de soudage devront éventuellement être ajustés lors de la réalisation des premières pièces.

### 3.4 Macrographies des soudures obtenues

Sur la figure 10 sont présentées des macrographies transversales des trois soudures obtenues mettant en évidence les quatre zones décrites à la figure 4.

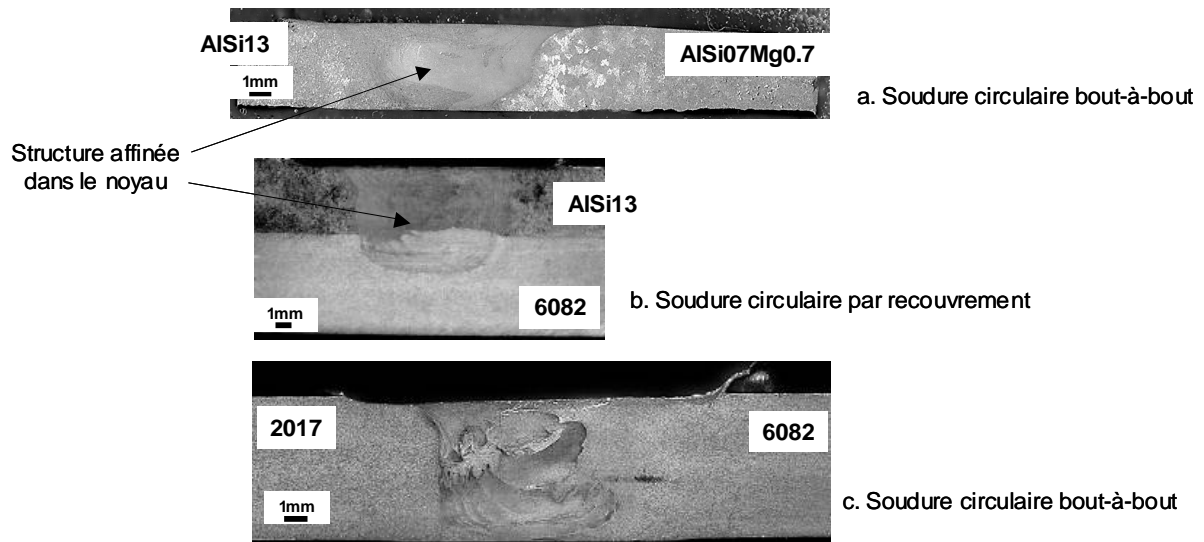


Figure 10 : macrographies des soudures obtenues

Une étude particulière a été menée sur la soudure obtenue par transparence entre l'alliage de fonderie de la cloche et l'alliage 6082 corroyé. Les deux matériaux sont malaxés ensemble, le flux de matière se fait autour du pion mais également de bas en haut, assurant une bonne « interpénétration » des deux matériaux. On remarque que la structure de fonderie est affinée par l'action du malaxage (Voir figure 11).

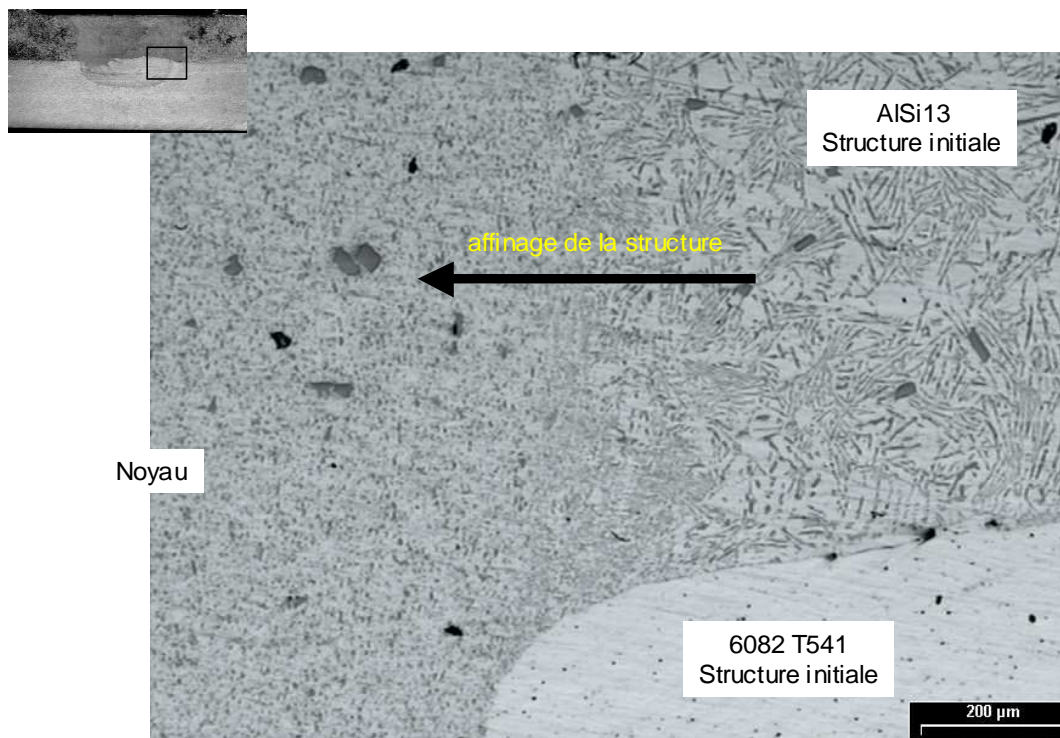


Figure 11 : micrographie de la soudure par recouvrement AlSi13 sur 6082

#### 4. Conclusions

L'étude et la réalisation du démonstrateur ont permis de mettre en évidence le potentiel du FSW pour le soudage d'alliages de fonderie et d'alliages sensibles à la fissuration à chaud. Les possibilités de soudages hétérogènes ont également été démontrées.

La réalisation d'une pièce optimisée en termes de fonctionnalité (nuance, géométrie...), de coût de fabrication passe par une intégration totale du procédé FSW. Celle-ci impose une reconception intégrale du produit prenant en compte les contraintes et spécificités liées à la mise en œuvre du procédé FSW :

- accessibilité de l'outil à la soudure
- confinement de la matière lors du malaxage, ce qui se traduit par la nécessité de placer une enclume à l'envers de la soudure et d'avoir une surface d'accueil de l'épaulement plane ou de faible courbure

L'introduction du FSW permettrait d'élargir les domaines d'application de la fonderie par la fabrication de pièces multimatériaux produites de manière plus simple et donc moins coûteuse. Par les possibilités qu'il offre, le FSW apparaît comme une technologie d'assemblage innovante promise à un développement important notamment en fonderie.

#### Références

- [1] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Templemith, C.J. Dawes, patent application, No. 9125978.8
- [2] R.S Mishra, Z.Y. Ma. "Friction Stir Welding and processing". Materials Sciences and Engineering R 50 (2005) I-78
- [3] S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, J.-C. Goussain, P. Martin, R. Bigot. "Methodology for qualifying Friction Stir Welding equipment". Proceedings of the 7th International Symposium on FSW 2008
- [4] C. L. Campbell, M. S. Fullen, M. J. Skinner. "Control system for control for control system for friction stir welding background of the invention". International Application No.: PCT/US1999/015587
- [5] S. Zimmer, W. Chapeau, B. Da Costa and al. "Manuel Pédagogique. Le Soudage par friction malaxage Friction Stir Welding". ISBN : 978-2-900781-67-8