



**HAL**  
open science

# Etablissement de fenêtre opératoire par une approche expérimentale de la mesure de température lors du procédé FSW

Moura Abboud, Laurent Dubourg, Adrien Leygue, Guillaume Racineux,  
Olivier Kerbrat

► **To cite this version:**

Moura Abboud, Laurent Dubourg, Adrien Leygue, Guillaume Racineux, Olivier Kerbrat. Etablissement de fenêtre opératoire par une approche expérimentale de la mesure de température lors du procédé FSW. Conference Manufacturing21, Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay [ENS Paris Saclay], Oct 2022, Gif Sur Yvette, France. hal-04011642

**HAL Id: hal-04011642**

**<https://hal.science/hal-04011642v1>**

Submitted on 2 Mar 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Etablissement de fenêtre opératoire par une approche expérimentale de la mesure de température lors du procédé FSW

**Moura ABOUD<sup>(a)(b)</sup>, Laurent DUBOURG<sup>(b)</sup>, Adrien LEYGUE<sup>(c)</sup>,  
Guillaume RACINEUX<sup>(c)</sup>, Olivier KERBRAT<sup>(a)</sup>**

*(a) Université de Rennes, ENS Rennes, CNRS, GeM, UMR 6183, 35000 Rennes*

*(b) Stirweld, 35170 Bruz*

*(c) Nantes Université, Ecole Centrale de Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, 44321 Nantes*

Mail : [moura.abboud@ens-rennes.fr](mailto:moura.abboud@ens-rennes.fr)

## Résumé :

Cet article prend appui sur l'utilisation d'un système de mesure de température lors du procédé de soudage par friction-malaxage (FSW) pour déterminer les fenêtres opératoires du procédé.

En effet, un des grands défis rencontrés lors du FSW est la variation de température qui selon les paramètres du procédé (vitesse d'avance et rotation, force d'appui, géométrie de l'outil), le type et l'épaisseur de l'alliage utilisé, engendrant des défauts de porosité. Selon la norme ISO 25239, les porosités dépendant de leur position, définissent une soudure chaude ou froide caractérisant la qualité de soudure. Ainsi, pour délimiter la fenêtre opératoire du procédé, un protocole d'expérimentations a été mis en place sur des alliages aluminium AA-6082 et AA-5754 avec différents outils. Le principe de ces expérimentations est de modifier les paramètres FSW et de mesurer la température au cours du procédé. Des coupes métallographiques sont réalisées pour observer les soudures, déterminer les porosités et ainsi trouver la fenêtre opératoire.

Les résultats montrent que quels que soit les paramètres, la température maximale ne dépasse pas celle du solidus de l'alliage et la meilleure combinaison qualité-productivité sera obtenue pour une température maximale au cours de la soudure de 70 à 80 % celle du solidus. Ce protocole permet alors d'aboutir rapidement à la fenêtre technologique de

paramètres opératoires adaptés au couple outil-matière. Le but de cette démarche est d'établir les relations entre la température, les variables du procédé et la qualité de soudure pour réduire le nombre d'essais, le coût et augmenter le taux de productivité.

**Mots clés :** Soudage par friction malaxage, Défauts de porosité, Alliage aluminium, Paramètres procédé, Qualité de soudure, Fenêtre technologique.

## 1 Introduction

### 1.1 Contexte général

Le procédé de soudage par friction malaxage FSW est une technique d'assemblage inventée par The Welding Institute TWI en 1991. Il est désormais arrivé à un degré de maturité industrielle où il est appliqué dans la production en série.

Il est aujourd'hui largement utilisé dans des applications industrielles variées telles que le soudage d'alliages spatiaux, aéronautiques ou automobiles. Cette technique consiste à assembler deux pièces en les amenant à un état pâteux à l'aide d'un outil rotatif qui plonge dans la ligne de joint et ensuite traverse le long de cette ligne (Figure 1). L'outil est non consommable, constitué d'un pion de petit diamètre s'étendant vers le bas à partir d'un épaulement de plus grand diamètre.

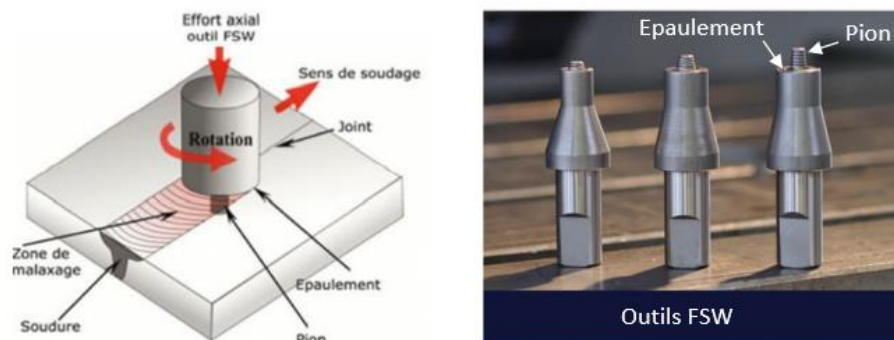


Figure 1 – Principe du soudage par friction malaxage et outils FSW

L'insertion du pion rotatif chauffe le matériau environnant, lui permettant d'être déformé par le mouvement. En plus, l'effort lié au contact de l'épaulement avec la pièce fournit un chauffage par friction supplémentaire autour du pion inséré (Figure 2).

La chaleur générée lors du procédé FSW résulte de deux phénomènes :

- La déformation plastique du matériau autour de l'outil, dépendant des vitesses d'avance et de rotation ;
- Le frottement entre l'outil et la matière gouverné principalement par la géométrie de l'outil de soudage FSW, la force d'appui et la vitesse de rotation. La chaleur est générée pendant deux processus qui apparaissent lors le contact de l'outil et pièce à souder : le collage, dans lequel la matrice proche de la surface de l'outil y adhère, et le glissement durant lequel la surface de l'outil et le matériau de la pièce glissent l'un par rapport à l'autre (Aziz *et al.*, 2016).

Plusieurs travaux sur l'interaction entre l'outil et la matière ont été réalisés pour étudier le contact entre l'outil et la matière, et comprendre la différence entre les conditions de

glissement et de collage (Schmidt and Hattel, 2005) en fonction des paramètres du procédé (Morisada et al. 2015).

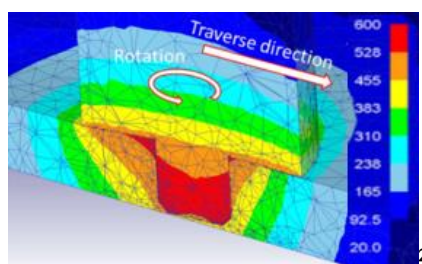


Figure 2 – Distribution de la température (°C) autour de l'outil de soudage FSW (Nakamura et al., 2018)

Cependant, le contrôle de la qualité de la soudure représente une tâche difficile à cause de la variation de la température tout au long de la soudure. Le réglage des paramètres de soudage FSW représente un point critique pour obtenir une soudure de bonne qualité. La température augmente si la vitesse de rotation augmente et diminue lorsque la vitesse d'avance augmente (Adriana and Obregon, 2011).

D'après la norme ISO 25239, les défauts de porosité d'une soudure par suite de l'évolution de la température se divisent en deux parties :

- Soudure froide dont les porosités se situent en bas de la soudure (Figure 3-a)
- Soudure chaude dont les porosités se situent en haut de la soudure (Figure 3-b)



Figure 3 - Défauts de porosités : soudure froide (a) soudure chaude (b)

Le but actuel du procédé FSW est d'augmenter les performances des assemblages, la productivité et garantir une qualité optimale, en prenant compte tous les paramètres qui affectent la température qui à son tour détermine la qualité d'une soudure.

### 1.2 Mesures de températures en FSW

Plusieurs techniques de mesure de température ont été explorées par des chercheurs afin de mesurer ou de prévoir la température de la soudure, notamment en utilisant des thermocouples intégrés dans la pièce ou dans l'outil FSW, et des caméras thermiques.

Des thermocouples intégrés dans les pièces à souder permettent de mesurer la température dans chaque zone des joints FSW en fonction de leur position de fixation (Mao Yuqing 2016). La rotation de la broche et la déformation plastique du matériau peuvent affecter la position du thermocouple dans la pièce. (Silva, De Backer and Bolmsjö, 2017) ont proposé une étude intense avec plusieurs positions du thermocouple. L'inconvénient est de devoir instrumenter une pièce pour chaque configuration de soudage. En plus, cette méthode ne peut pas être utilisée à des fins d'inspection des soudures en production, car les thermocouples ne peuvent pas être retirés sans endommager la partie soudée.

L'utilisation de thermocouples intégrés dans l'outil a été étudiée et appliquée avec succès dans le processus FSW. Le thermocouple est généralement inséré à travers un trou percé dans l'outil et positionné le plus près possible de l'interface outil-pièce offrant une réponse plus rapide aux perturbations pendant le soudage. Le contact direct du thermocouple avec le métal de base a été rapporté par (Fehrenbacher 2014) qui a utilisé deux thermocouples intégrés dans l'outil. Les défis rencontrés lors de l'utilisation de cette méthode sont la transmission du signal de données de l'outil en rotation (utilisation de Bluetooth) et, dans le cas d'outils de petit diamètre, le nombre limité de thermocouples et la difficulté de les localiser dans les positions souhaitées.

La caméra thermique au-dessus des pièces à souder (Lambiase 2018) permet d'effectuer plusieurs tests sans avoir à modifier les pièces. Cependant, il existe certaines limitations liées aux zones de mesure et des problèmes associée à la qualité de la mesure. En ce qui concerne la zone de mesure, la zone accessible est à l'extérieur de l'épaulement et uniquement en surface. En outre, des problèmes de qualité sont dus à l'émissivité de l'aluminium et la difficulté à fixer la caméra orthogonalement à la pièce.

### 1.3 Solution « Stirweld »

Dans ce contexte, un système innovant de mesure de température intégré dans l'outil a été développé pour la société Stirweld (qui développe des têtes de soudage FSW) afin de mesurer la température de soudage en temps réel en utilisant un système de transmission par câble, et la position du thermocouple permet son intégration dans des outils de différents diamètres tout en restant dans une position la plus proche possible de la soudure.

La difficulté est d'avoir une bonne température qui permet de qualifier une soudure. En utilisant la technique innovante de mesure de température, des fenêtres opératoires sont obtenues et délimitées pour montrer les différentes zones de soudure. Ainsi la section 2 présente les essais réalisés, la section 3 montre les résultats obtenus sur deux nuances d'alliages d'aluminium (AA 6082 et AA 5754) avant une discussion (section 4) et une conclusion (section 5).

## 2 Méthodologie

### 2.1 Outil FSW

L'outil FSW utilisé de base acier X37CrMoV5-1 H11 qui présente une excellente résistance aux chocs, une bonne tolérance aux déformations plastiques, une bonne résistance à la fatigue, à l'usure, à la corrosion, et à l'oxydation.

Les dimensions de l'outil sont : un diamètre d'épaulement 8,5 mm, un pion conique avec un diamètre 4 mm à la base et 3 mm au bout, et une hauteur du pion 3 mm (Figure 4).

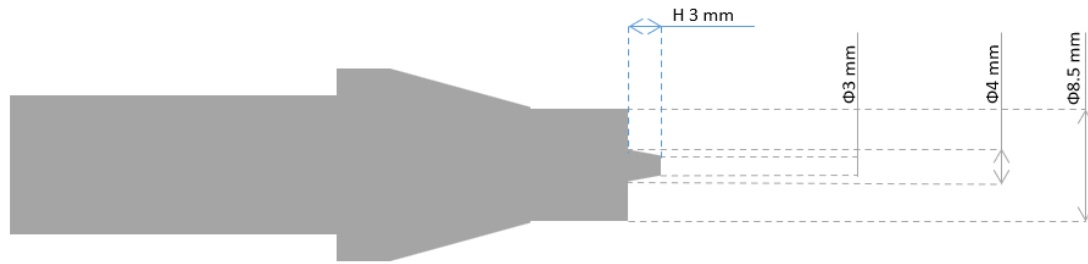


Figure 4 - Paramètres dimensionnels de l'outil FSW

Cet outil est percé afin de pouvoir insérer le thermocouple à l'intérieur de l'outil pour une bonne mesure de température. La distance entre le thermocouple et la soudure est optimisée par une position précise du thermocouple dans l'outil.

## 2.2 Thermocouple

Le thermocouple utilisé dans cette campagne expérimentale est de type J avec un diamètre de 2 mm. C'est l'un des rares thermocouples pouvant être utilisé en toute sécurité dans des atmosphères réductrices. La température maximale de fonctionnement continu est d'environ 800 °C, bien que pour une utilisation à court terme, des températures allant jusqu'à 1 000 °C puissent être gérées.

## 2.3 Alliage aluminium

Les métaux de base utilisés sont AA-6082 T6, un alliage structural avec une moyenne résistance mais une excellente résistance à la corrosion couramment utilisé pour l'usinage, ayant une température de solidus de 555 °C, et AA-5754 H11, un alliage avec une résistance élevée ayant une température de solidus de 610 °C.

Les alliages sont sous forme de tôles rectangulaires de dimensions 595x120x4 mm (longueur x largeur x épaisseur).

## 2.4 Approche expérimentale

Les expérimentations sont réalisées sur les deux différentes nuances d'aluminium AA-6082 et AA-5754, le même système de bridage était utilisé (Figure 5).

La machine utilisée est une machine CNC, HAAS VF3, avec une tête FSW de la société Stirweld.



Figure 5 – Système de bridage des essais FSW

Des soudures de longueur 250 mm sont réalisées (Figure 6) en faisant varier la vitesse de rotation  $\omega$  entre 980 tour/min et 3500 tour/min et la vitesse d'avance  $V$  entre 100 mm/min et 1000 mm/min pour le AA-6082 (Table 1) et la vitesse de rotation  $\omega$  entre 980 tour/min et 3500 tour/min et la vitesse d'avance  $V$  entre 25 mm/min et 2250 mm/min pour le AA-5754 (Table 2)

Table 1 – Paramètres des essais réalisés sur la nuance AA-6082

|                     |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| V (mm/min)          | 100  | 200  | 294  | 378  | 420  | 504  | 630  | 1000 |
| $\omega$ (tour/min) | 2100 | 980  | 980  | 980  | 980  | 980  | 980  | 1260 |
|                     | 2800 | 1260 | 1260 | 1260 | 1260 | 1260 | 1260 | 1420 |
|                     | 3500 | 1420 | 1420 | 1420 | 1420 | 1420 | 1420 | 2100 |
|                     |      | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 | 1680 | 2800 |
|                     |      | 2100 | 2100 | 2100 | 2100 | 2100 | 2100 |      |
|                     |      | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 |      |
|                     |      | 3500 |      |      |      |      |      |      |

Table 2 – Paramètres des essais réalisés sur la nuance AA-6082

|                     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| V (mm/min)          | 25   | 50   | 100  | 420  | 630  | 1000 | 1500 | 1750 | 2000 | 2250 |
| $\omega$ (tour/min) | 3500 | 980  | 980  | 980  | 980  | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 |
|                     |      | 1420 | 1420 | 1420 | 1420 | 3500 | 3500 |      | 3500 | 3500 |
|                     |      | 2800 | 2800 | 2800 | 2800 |      |      |      |      |      |
|                     |      | 3500 | 3500 | 3500 | 3500 |      |      |      |      |      |

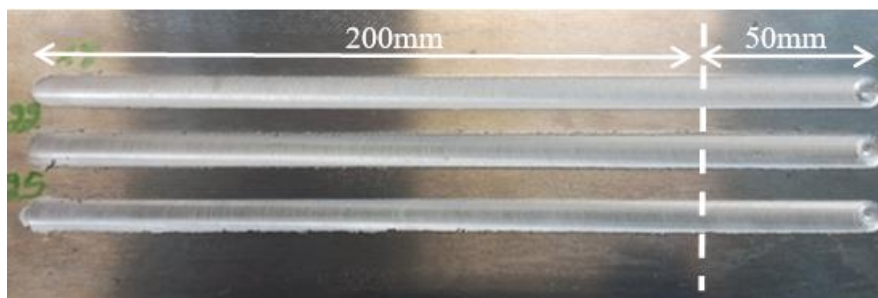


Figure 6 - Soudures FSW

Dans le respect de la norme ISO 25239, des coupes macrographiques sont effectuées à 50 mm de la fin de la soudure pour faire le polissage et observer la structure métallographique pour qualifier la soudure. L'observation permet en effet de détecter des porosités et leur position, afin de conclure à une soudure « bonne » (sans porosité), « froide » ou « chaude » (suivant la position des porosités observées).

### 3 Résultats

#### 3.1 Coupes macrographiques

Les vues métallographiques des deux nuances d'aluminium sont montrées sur les Figure 7 et Figure 8.

Les soudures avec une porosité en bas de la soudure représentent les soudures froides (contour bleu), les soudures avec une porosité en haut de la soudure représentent les soudures chaudes (contour rouge), et les soudures sans porosité représentent une bonne qualité (contour vert). Nous distinguons ainsi une fenêtre opératoire pour chaque nuance, permettant par la suite d'optimiser les paramètres de fabrication afin d'améliorer la productivité (vitesse) tout en garantissant une soudure « bonne ».

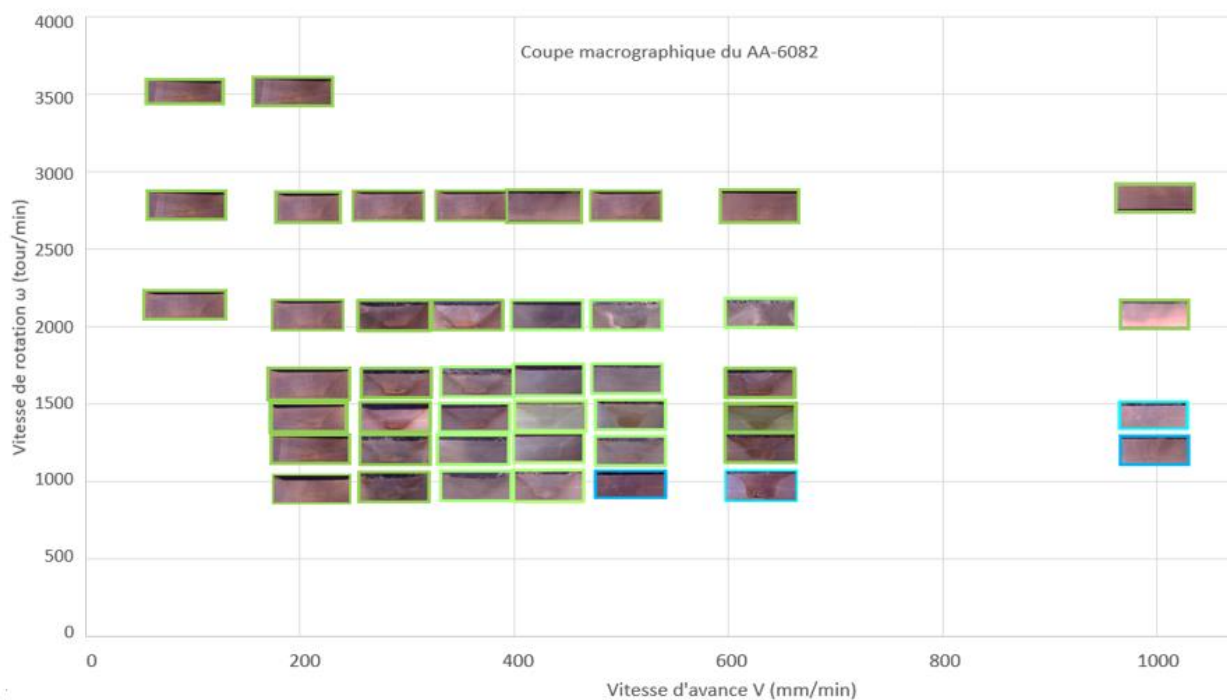


Figure 7 – Coupe macrographique du AA-6082



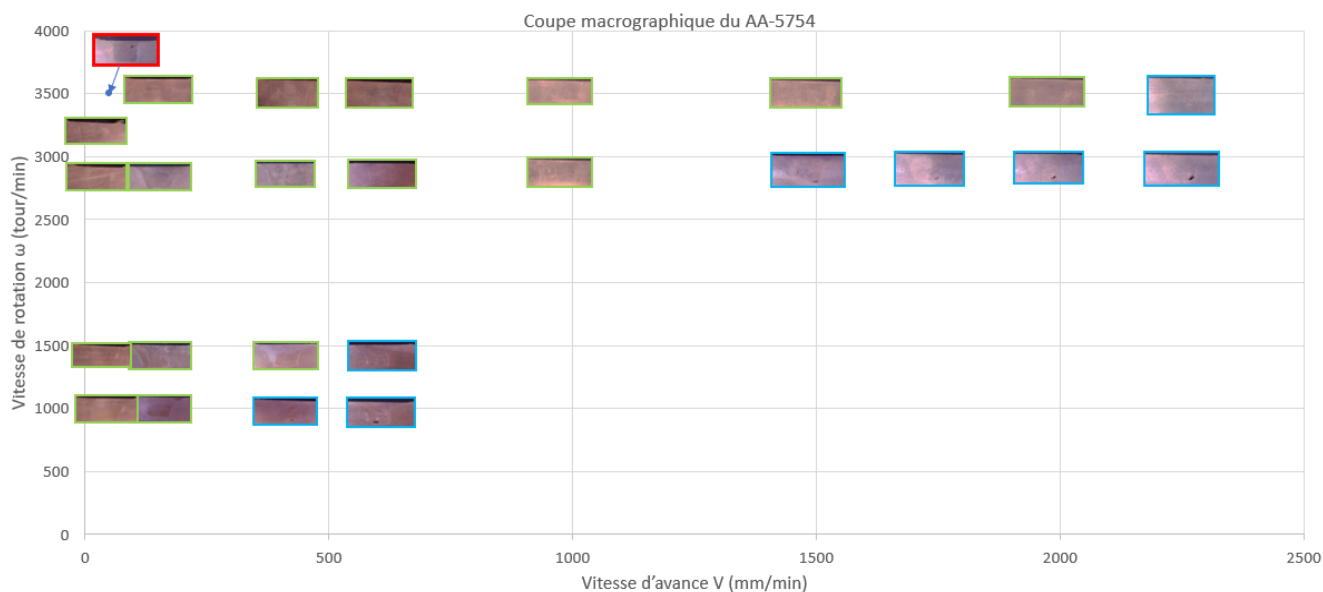


Figure 8 - Coupe macrographique du AA-5754

### 3.2 Courbes de température du AA-6082 et AA-5754

La variation de la température est mesurée en continu à l'aide du thermocouple tout au long de la soudure. La température prise est celle où se situe la coupe macrographique.

A l'aide de MATLAB et à partir de la température mesurée pour chaque essai (vitesse d'avance ; vitesse de rotation), les courbes isothermes sont représentées (Figure 9).

Ces courbes permettent de mettre en évidence que la température maximale n'atteint jamais la température du solidus du matériau (Chao, Qi and Tang, 2003). Ainsi une limite (courbe noire) existe entre la zone des soudures « froides » (relevées par les points expérimentaux bleus) et la zone des soudures « bonnes » (relevés par les points expérimentaux verts). En outre, ces graphiques présentent des courbes isothermes où la température est constante tout au long de chaque courbe. Ceci nous permet de prévoir les températures à des vitesses de rotation et d'avance pour des essais non réalisés.

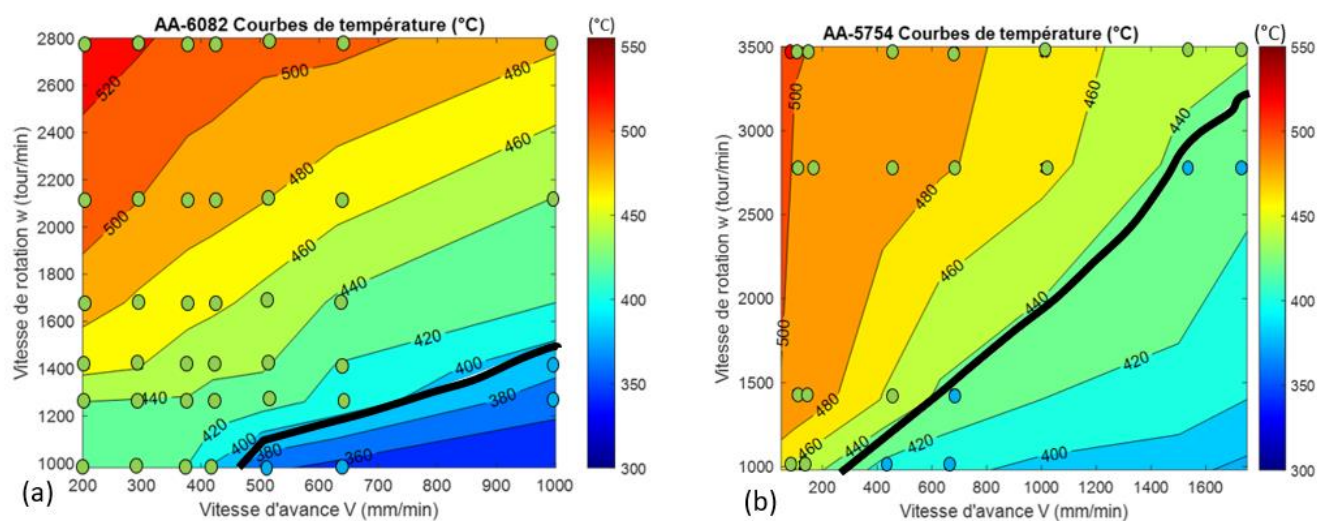


Figure 9 – Courbes de température : (a) AA-6082 (b) AA-5754

## 4 Discussion

Pour les deux types de matériau la température augmente logiquement avec l'augmentation de vitesse de rotation et la diminution de la vitesse d'avance.

Les résultats des essais sur les deux alliages sont différents ce qui montre que la température varie selon le type du matériau.

Pour AA-6082, une bonne soudure est obtenue à partir d'une température de 400 °C soit  $0,72.T_{\text{solidus}}$  (°C) tandis que pour le AA-5754, une bonne soudure est obtenue à partir d'une température de 436 °C soit  $0,71.T_{\text{solidus}}$  (°C).

Selon (Okamura 2000), la zone de soudabilité est comprise entre deux isothermes  $0,75.T_f$  (K) et  $0,8.T_f$ (K). Cette fenêtre de fonctionnement est limitée entre  $0,7.T_f$  (K) et  $0,8.T_f$  (K) d'après les résultats de (Gratecap, Racineux and Marya, 2008).

Les résultats de nos essais réalisés permettent de voir que la limite qui existe entre la zone soudure froide et la zone d'une bonne soudure s'étend de 0,7 à 0,8  $T_{\text{solidus}}$  (°C).

D'après les Figure 9, la température maximale se stabilise à des vitesses de rotation grandes et des vitesses d'avance petites mais ne dépasse jamais la température du solidus du matériau. Ce résultat est en concordance avec la littérature (Ambrosio *et al.*, 2022) (Figure 10 ).

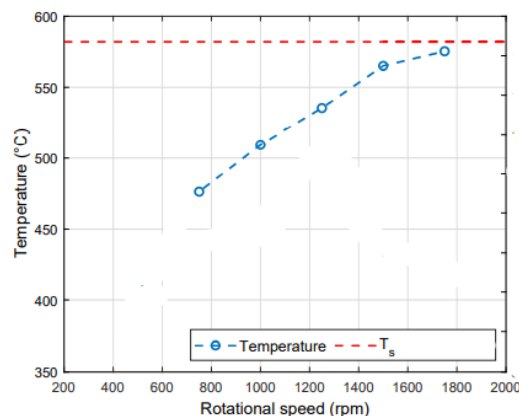


Figure 10 - Température maximale en fonction de la vitesse de rotation pour le AA-6082 (Ambrosio *et al.*, 2022)

## 5 Conclusion

Dans cet article, nous avons expérimenté une technique qui permet de mesurer la température en temps réel du soudage et qualifier une soudure d'une façon rapide, afin d'obtenir des fenêtres de fonctionnement.

En utilisant cette technique on peut réduire le coût des essais en réduisant leur nombre et adaptant cette technique comme remplaçante du procédé de polissage et de coupes macrographiques. En effet, la réalisation d'un faible nombre d'essais en mesurant la température permet de visualiser la fenêtre opératoire et la limite entre soudures froides et soudures bonnes. Le choix des paramètres peut alors se faire en cherchant à augmenter la productivité (augmenter la vitesse d'avance) sans passer du côté des soudures froides.

Ainsi, des essais à très hautes vitesses de rotation et d'avance peuvent être réalisés tout en restant dans la fenêtre opératoire.

Néanmoins, un certain nombre de paramètres, tels que la géométrie de l'outil, la force de forgeage et l'épaisseur du matériau ne sont pas pris en compte dans notre étude. Ces aspects seront étudiés dans la suite de nos travaux pour pouvoir généraliser l'utilisation de cette méthode.

## Remerciements

Les auteurs remercient Stirweld qui finance le projet dans le cadre d'une collaboration.

## Références

- Adriana, M. and Obregon, T. (2011) 'Effect of Process Parameters on Temperature Distribution, Microstructure, and Mechanical Properties of Self- Reacting Friction Stir Welded Aluminum Alloy 6061-T651', *NMC Information Services Concurrent Technologies Corporation, Harrisburg, PA, USA*.
- Ambrosio, D. *et al.* (2022) 'A semi-empirical model for peak temperature estimation in friction stir welding of aluminium alloys', *Science and Technology of Welding and Joining*. doi: 10.1080/13621718.2022.2065106.
- Aziz, S. B. *et al.* (2016) 'Impact of Friction Stir Welding (FSW) process parameters on thermal modeling and heat generation of aluminum alloy joints', *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29(9), pp. 869–883. doi: 10.1007/s40195-016-0466-2.
- Chao, Y. J., Qi, X. and Tang, W. (2003) 'Heat transfer in friction stir welding - Experimental and numerical studies', *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 125(1), pp. 138–145. doi: 10.1115/1.1537741.
- Fehrenbacher, A., Duffie, N. A., Ferrier, N. J., Pfefferkorn, F. E. et Zinn, M. R. (2014). Effects of tool-workpiece interface temperature on weld quality and quality improvements through temperature control in friction stir welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4):165–179
- Gratecap, F., Racineux, G. and Marya, S. (2008) 'A simple methodology to define conical tool geometry and welding parameters in friction stir welding', *International Journal of Material Forming*, 1(3), pp. 143–158. doi: 10.1007/s12289-008-0370-z.
- H. Okamura. Visualization of material flow in an autogenous friction stir weld. *Journal of Japan Welding Society* 2000, 69 (7):565—571, 2000.
- Lambiase, F., Paoletti, A. et Di Ilio, A. (2018). Forces and temperature variation during friction stir welding of aluminum alloy AA6082-T6. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1-4):337–346
- Morisada, Y., Imaizumi, T. et Fujii, H. (2015). Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 20(2):130–137
- Nakamura, T. *et al.* (2018) 'Friction stirwelding of non-heat-treatable high-strength alloy 5083-O', *Metals*, 8(4), pp. 1–17. doi: 10.3390/met8040208.
- Schmidt, H. and Hattel, J. (2005) 'A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding', *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 13(1), pp. 77–93. doi: 10.1088/0965-0393/13/1/006.
- Silva, A. C. F., De Backer, J. and Bolmsjö, G. (2017) 'Temperature measurements during friction stir welding', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(9–12), pp. 2899–2908. doi: 10.1007/s00170-016-9007-4.
- Yuqing M, Liming K, Fencheng L, Yuhua C, Li X (2016) Investigations on temperature distribution, microstructure evolution, and property variations along thickness in friction stir welded joints for thick AA7075-T6 plates. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 86 (1):141-154. doi:10.1007/s00170-015-8182-z