



**HAL**  
open science

## Mouvement de la matière lors du soudage FSW : Expériences et Simulations

Olivier Lorrain, Véronique Favier, Hamid Zahrouni, Didier Lawrjaniec

### ► To cite this version:

Olivier Lorrain, Véronique Favier, Hamid Zahrouni, Didier Lawrjaniec. Mouvement de la matière lors du soudage FSW : Expériences et Simulations. 9e Colloque national en calcul des structures, CSMA, May 2009, Giens, France. hal-01418173

**HAL Id: hal-01418173**

**<https://hal.science/hal-01418173>**

Submitted on 16 Dec 2016

**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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Mouvement de la matière lors du soudage FSW : Expériences et Simulations

O. Lorrain<sup>1</sup>, V. Favier<sup>2</sup>, H. Zahrouni<sup>3</sup>, D. Lawrjaniec<sup>4</sup>

<sup>1</sup> LPMM UMR CNRS 7554 Arts et Métiers Paris Tech - Metz  
4 rue Augustin Fresnel – 57078 Metz Cedex 3  
olivier.lorrain@metz.ensam.fr

<sup>2</sup> LIM UMR CNRS 8006 Arts et Métiers Paris Tech - Paris  
151 boulevard de l'Hôpital – 75013 Paris  
veronique.favier@paris.ensam.fr

<sup>3</sup> LPMM UMR CNRS 7554 Université de Metz  
Ile du Saulcy – 57045 Metz  
zahrouni@univ-metz.fr

<sup>4</sup> Plateforme Mécanique et Corrosion Institut de Soudure Recherche et Enseignement  
Espace Cormontaigne, 4 boulevard Henri Becquerel – 57970 Yutz  
d.lawrjaniec@institutdesoudure.com

---

**Résumé** – Afin de diminuer les temps de calculs et coûts de développement, un modèle numérique est développé pour déterminer les paramètres optimaux pour une soudure FSW. La caractérisation du mouvement de la matière doit permettre de qualifier la qualité de la soudure. Une étude de ces mouvements de matière est proposée ici et compare les résultats expérimentaux à ceux issus de simulations numériques sous FLUENT.

**Mots clés** – FSW, Simulation numérique, écoulement.

---

## 1 Introduction

### 1.1 Présentation du procédé

Le soudage par friction malaxage ou « Friction Stir Welding » (FSW) est un procédé récent inventé et breveté par l'institut de soudure britannique : The Welding Institute (TWI). Ce procédé, sans apport de matière, consiste à brasser et mélanger localement les matériaux des deux tôles à assembler à l'aide d'un outil constitué d'un pion (pin) et d'un épaulement (shoulder). Le rôle de cet outil est de provoquer la déformation plastique de la matière ainsi que son échauffement par frottement. Ainsi, le malaxage se fait à un état « pâteux ». Le procédé est présenté sur la Figure 1.

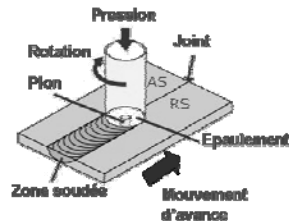


Figure 1: Présentation du procédé

Différents paramètres influencent la formation du joint et de ce fait la qualité de la soudure obtenue. La vitesse de rotation,  $\omega$ , la vitesse d'avance  $V$ , l'effort de plongée,  $F$  et l'angle de tilt, ont évidemment un impact direct. La géométrie de l'outil joue également un rôle prépondérant dans le trajet de la matière lors du procédé. Elangovan et Balasubramanian [3] l'ont démontré en utilisant cinq géométries de pion différentes : cylindrique, cylindrique fileté, conique, à section carrée, à section triangulaire. Afin de mettre en place un modèle numérique prédictif, il est nécessaire dans un premier temps de comprendre finement les phénomènes mis en jeu lors du procédé. C'est l'objet du travail présenté ici.

## 1.2 Etat de l'art sur les mouvements de matière

Différentes méthodologies ont été mises en place afin de montrer les mouvements de matière lors du procédé FSW : utilisation de billes d'aciers insérées dans les tôles à souder, feuillards ou particules d'un autre matériau [2][4][7][8]. L'utilisation de feuillards de cuivre ou d'aluminium pur semble être le moyen le plus facile à mettre en œuvre. Cependant, elle ne permet pas de mettre en évidence les mouvements dans l'épaisseur. L'insertion de particules ou de fils de matériau différent de celui à souder permet l'observation de ces mouvements mais est plus difficile à mettre en œuvre.

Le pion et l'épaulement jouent deux rôles différents qui se caractérisent par des positions finales de la matière bien différentes. Les particules situées sous l'épaulement sont affectées par celui-ci et sont déposées de manière préférentielle du côté Advancing Side (AS), côté où le vecteur vitesse dû à l'avance de l'outil est dans le même sens que le vecteur vitesse dû à la rotation de l'outil. Lorsque l'on observe des particules situées dans des zones plus profondes par rapport à l'épaulement, c'est le pion qui influence l'écoulement. Dans ce cas, la matière est déposée majoritairement du côté Retreating Side (RS), côté où les vecteurs vitesses sont opposés. Cet aspect est influencé par la vitesse de rotation de l'outil. A faible vitesse, le feuillard longitudinal revêt la forme d'un S alors qu'à plus forte vitesse il a la forme d'un C.

Des stries d'espacement égal à l'avance par tour ont été observées par la plupart des auteurs ainsi que des répartitions par strate de la matière dans le cas de soudures hétérogènes. Une décomposition de la zone de flux en trois zones distinctes est proposée. Ces trois zones représentées par des cercles en coupe ne sont pas concentriques et représentent bien la différence de trajet entre les particules issues du côté AS et celles du côté RS. La présence des stries est imputable pour certains à un défaut de co-axialité de l'outil. Cette théorie peut également expliquer la présence des trois zones de flux.

## 2 Etude expérimentale

### 2.1 Matériau et équipement

Une campagne d'essais expérimentaux de soudure FSW a été réalisée à l'Institut de Soudure afin de permettre une bonne visualisation et donc la compréhension du trajet de la matière. Contrairement aux résultats trouvés dans la littérature, cette étude analyse l'écoulement

de la matière dans le cas d'un soudage avec un pion non fileté. Ce choix se justifie par la volonté de confronter expérience et simulation dans des conditions identiques du procédé. Or, pour se rapprocher des conditions industrielles, les expériences sont couramment réalisées avec des pions filetés alors que les simulations du procédé utilisent en général des pions non filetés à cause de la difficulté numérique d'intégrer l'effet géométrique des filets sur l'écoulement. Les différents jeux de paramètres utilisés sont présentés dans le Tableau 1.

$\omega$ (mm/min)	100	300	100	500	500	900	900
F (kg)	750	1200	600	1100	900	1200	750
V (tr/min)	300	300	600	600	900	900	1620

Tableau 1 : Jeux de paramètres utilisés dans l'étude expérimentale

Les essais ont été réalisés avec un angle de tilt de  $2.5^\circ$ . Deux outils ont été mis en œuvre afin de procéder aux essais expérimentaux :

- un outil cylindrique de révolution avec un pion de diamètre  $D_p=5\text{mm}$  et un épaulement concave de diamètre  $D_s=13\text{mm}$
- un outil avec méplat de géométrie similaire avec l'ajout de 3 méplats.

Des tôles d'aluminium 7020 de 4mm d'épaisseur ont été soudées suivant différentes configurations. Des essais pleine tôle permettent une observation du joint soudé et de mettre en évidence l'influence des conditions opératoires sur la morphologie de la soudure. Des feuilards de cuivre, ont été insérés comme marqueurs entre les tôles avant la soudure et permettent de visualiser les mouvements de matière. Différentes coupes permettent alors d'observer la position finale du feuilard. Les différentes configurations sont présentées sur la Figure 2. Le feuilard de cuivre est représenté en gris foncé.

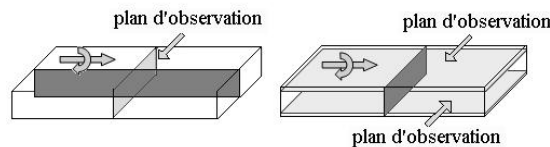


Figure 2 : Orientations des feuilards et des observations : feuilard longitudinal (a), feuilard transversal (b)

## 2.2 Résultats

### 2.2.1 Géométrie générale des joints

La dissymétrie entre AS et RS apparaît clairement et est en accord avec la littérature. La taille de la Zone Affectée Thermiquement (ZAT) augmente lorsque la vitesse d'avance diminue. Ceci met en évidence le rôle de la vitesse d'avance sur le malaxage. En effet, plus celle-ci est importante, plus les cycles thermiques sont courts et la matière environnant le pion est froide. De ce fait, sa résistance au malaxage est plus grande et rend difficile ce dernier.

### 2.2.2 Essais avec feuilard

La présence d'un feuilard ne semble pas perturber le flux de matière lors du procédé. Les résultats obtenus en terme d'écoulement de matière semblent donc représentatifs des phénomènes ayant lieu lors du procédé. Les résultats de la littérature sur l'influence du pion et de l'épaulement sont confirmés par les observations. En position proche de l'épaulement, la matière est déposée du côté AS alors que loin de l'épaulement, le rôle du pion semble être de déposer la matière du côté RS. Bien que les défauts soient de taille plus importante et situés en pied de soudure lors de l'utilisation d'un outil avec méplats, il semble que cet outil permette un

meilleur malaxage de la matière puisque le feuillard est coupé en des morceaux plus nombreux et plus petits.

Le nombre de tours effectués par la matière semble être en lien direct avec l'avance par tour R. Une avance par tour faible entraîne un nombre de tour plus important. L'existence d'une zone de rotation autour de l'outil semble donc être confirmée même si sa topologie n'a pu être déterminée. De plus, ce nombre de tours est directement influencé par la géométrie de l'outil : nombre de tours plus faible avec l'outil méplats. Enfin, la position dans l'épaisseur a aussi son importance : sous l'épaulement, le nombre de tours est plus grand qu'en fond de soudure. Ceci est dû à la différence de la nature des surfaces de contact entre les différentes composantes de l'outil. Les mouvements observés montrent qu'ils ont lieu strate par strate sans faire apparaître de composante verticale.

### 3 Simulation numérique

Différentes caractéristiques sur le mouvement de la matière lors du soudage par friction malaxage ont été mises en évidence précédemment. Pour obtenir un modèle prédictif, il semble nécessaire que celui-ci soit capable de reproduire ces caractéristiques. Le travail a donc pour but de présenter les résultats obtenus en utilisant une modélisation 2D et une autre 3D avec le logiciel FLUENT.

#### 3.1 Mise en place du problème

Le choix d'un modèle 2D est basé sur une volonté de diminution du temps de calcul pendant la période de mise en œuvre de la simulation numérique avant sa complexification. Cette modélisation permettra de simuler le soudage en pied de soudure, loin de l'épaulement.

Dans les conditions du procédé FSW, il semble nécessaire à la loi de comportement de prendre en compte la vitesse de déformation ainsi que la température. N'ayant pas de données internes sur le comportement de l'aluminium 7020, des courbes expérimentales d'alliage de la série 7xxx issues de la bibliographie ont été utilisées. Elles fournissent la limite d'écoulement des alliages considérés pour différentes vitesses et température. Les résultats de Lee et al. [6] concernent la nuance 7075, ceux de Colegrove et al. [1] le 7449 et enfin Hu et al. [5] le 7050. Pour reprendre les résultats de Colegrove et al. [1] et pour avoir une loi basée sur des phénomènes physiques, une loi thermiquement activée est retenue. Elle peut se mettre sous la forme (1):

$$\dot{\epsilon}_{eq} = A \sinh(\alpha \sigma_{eq}) \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \text{ ou encore } \sigma_{eq} = \frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh}\left(\left[\frac{\dot{\epsilon}_{eq}}{A} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)\right]^{1/n}\right) \quad (1)$$

où  $\sigma_{eq}$  est la contrainte d'écoulement équivalente,  $\dot{\epsilon}_{eq}$  la vitesse de déformation équivalente, R la constante des gaz parfaits, Q une énergie d'activation, n, A et  $\alpha$  des paramètres du matériau. T représente la température.

La viscosité dynamique apparente peut être déterminée à partir de la valeur de la limite d'écoulement  $\sigma_{eq}$  obtenue lors d'essai de traction :

$$\mu = \frac{\sigma_{eq}}{3\dot{\epsilon}_{eq}} \quad (2)$$

Toutes les simulations numériques sont réalisées avec un régime d'écoulement laminaire. La tôle est modélisée par un parallélépipède de longueur et largeur  $c_t=100\text{mm}$ , de hauteur  $h_t=4\text{mm}$ , percé en son centre d'un cylindre de révolution de diamètre  $r_p=2.5\text{mm}$ . Seule la phase

stationnaire du soudage est recherchée et est calculée de manière itérative. La Figure 3 présente les conditions aux limites appliquées sur les parois du domaine fluide pour une coupe au milieu de la tôle (correspondant au cas 2D).

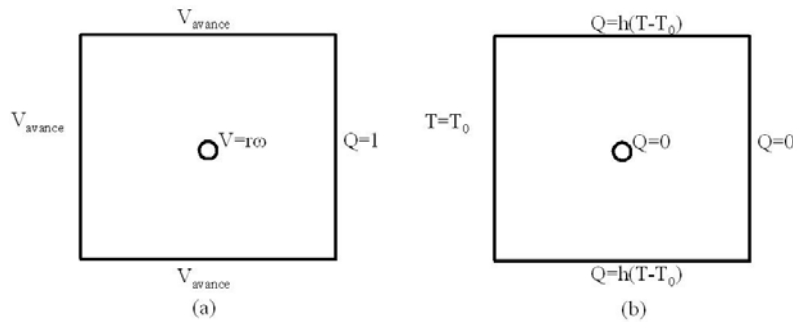


Figure 3 : Conditions aux limites appliquées : cinématiques (a), thermiques (b)

La matière entre dans le domaine à la température ambiante,  $T_0$ , et avec une vitesse,  $V_{avance}$ , perpendiculaire à la surface d'entrée. Sur les faces latérales du carré, un flux de chaleur convectif est imposé ainsi que la vitesse  $V$  (parallèle aux parois). Pour la sortie du fluide,  $Q$ , le quotient de débit est choisi égal à 1 ce qui signifie qu'il y a autant de matière qui sort du domaine que de matière qui y entre. Enfin, pour la zone correspondant à l'outil, il y a adhérence à la parois ce qui signifie une vitesse tangentielle imposée au fluide. Pour les calculs,  $V$  et  $\omega$  sont les valeurs expérimentales répertoriées dans le Tableau 1. En 3D, un disque correspondant à l'épaulement est ajouté et une vitesse de rotation est imposée. Des flux de chaleur convectifs sont également ajoutés sur les faces inférieures et supérieures du parallélépipède correspondant respectivement à l'échange avec la plaque support et l'échange avec l'air.

### 3.2 Résultats

Afin de vérifier, dans un premier temps, la cohérence du modèle, les cycles thermiques ont été observés et correspondent à ceux obtenus sur des soudures instrumentées en thermocouples. Dès lors, le modèle peut être utilisé afin d'étudier le mouvement de la matière lors du soudage.

Si l'on s'intéresse aux lignes d'écoulement, il est possible d'avoir une image du trajet de la matière lors du procédé. En 2D, quel que soit le jeu de paramètres considéré, les particules situées sur la surface d'entrée du fluide et d'ordonnées correspondante au pion finissent leur trajet coté RS. De plus, une zone de rotation est mise en évidence également pour les particules positionnées sur la ligne de joint et à proximité de l'outil. Cette zone est fortement influencée par la vitesse de rotation et très peu par la vitesse d'avance. Il semble donc que, qualitativement, les observations expérimentales soient reproduites ici. En effet, la simulation 2D, sans l'épaulement, correspond à la zone de la soudure située proche du pied de la soudure.

Pour le cas 3D, l'influence de la position dans l'épaisseur apparaît et est mise en évidence sur la Figure 4. Les particules situées sous l'épaulement sont déposées coté AS alors que celles situées plus bas sont déposées coté RS.

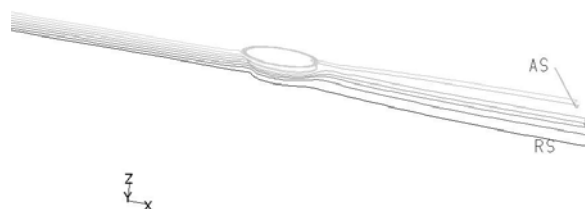


Figure 4 : Lignes d'écoulements de la simulation 3D

## 4 Conclusions

Les paramètres du procédé ont un impact direct sur le joint résultant. La vitesse d'avance, a une influence sur la largeur de la ZAT et ceci a été vérifié lors des essais expérimentaux. L'avance par tour agit aussi sur la réalisation du joint puisque des stries ont été observées et lui correspondent. De plus, le nombre de tours effectués par la matière avec l'outil semble lié à l'avance par tour  $R$  par une décroissance en  $1/R$ . Suivant la position dans l'épaisseur des particules considérées, le trajet de la matière est différent car ce ne sont pas les mêmes parties de l'outil qui interagissent avec la matière. En position haute, sous l'épaule, les particules sont majoritairement déposées du côté AS. Plus profond dans le joint, le pion a une influence majeure et la matière est majoritairement déposée du côté RS. Les résultats obtenus sont donc encourageants et en accord avec les expériences présentées dans la littérature.

Les capacités du logiciel FLUENT à la représentation du trajet de la matière lors du procédé FSW ont été testées pour les différentes géométries d'outil utilisées lors de la campagne expérimentale. Le trajet de la matière a été déterminé et analysé grâce aux résultats des simulations numériques. L'existence de différentes zones pour chacun des outils a été démontrée et est en accord avec les observations expérimentales.

## Références

- [1] P. A. Colegrove, H. R. Shercliff, R. Zettler, Model for predicting heat generation and temperature in friction stir welding from the material properties, *Science and Technology of Welding and Joining* (12), pp 284-297, 2007
- [2] K. Colligan, Material Flow Behaviour during Friction Stir Welding of Aluminum, *Welding Journal* (78) pp229-237, 1999
- [3] K. Elangovan, V. Balasubramanian, Influence of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminium alloy, *Materials Science and Engineering* (A459) pp7-18, 2007
- [4] M. Guerra, C. Schmidt, J.C. McClure, L.E. Murr, A.C. Nunes, Flow pattern during Friction Stir Welding, *Materials Characterization* (49) pp95-101, 2003
- [5] H.E. Hu, L. Zhen, L. Yang, W.Z. Shao, B.Y. Zhang, Deformation behavior and microstructure evolution of 7050 aluminum alloy during high temperature deformation, *Materials Science and Engineering* (A 488), pp 64-71, 2008
- [6] W.-S. Lee, W.-C. Sue, C.-F. Lin, C.-J. Wu, The strain rate and temperature dependence of the dynamic impact properties of 7075 aluminum alloy, *Journal of Materials Processing Technology* 100 pp116-122, 2000
- [7] H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel, Material Flow in butt friction stir welds in AA2024T3, *Acta Materialia* (54) pp1199-1209, 2006
- [8] T.U. Seidel, A.P. Reynolds, Visualization of Material Flow in AA2195 Friction-Stir Welds using a Marker Insert Technique, *Metallurgical and Materials Transactions* (32A) pp2879-2884, 2001