

Influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur le comportement mécanique de l'assemblage : analyse par émission acoustique et corrélation d'images numériques

M. CRACANEL^a, A. BOSNEAG^a, M. DIAKHATE^b, C. BADULESCU^c, E. NITU^a, M. IORDACHE^a, J. GRIGORE^a

a. Université de Pitești, 1, Rue Târgu din Vale, Pitești 110040, Roumanie

el_nitu@yahoo.com

b. Univ. Bretagne Occidentale, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29600 Morlaix, France

malick.diakhate@univ-brest.fr

c. ENSTA Bretagne, IRDL-UMR CNRS 6027, F-29200 Brest, France

claudiu.badulescu@ensta-bretagne.fr

Résumé :

La technologie de soudage par friction malaxage, plus connue sous son acronyme anglais FSW est largement adoptée dans l'industrie des transports pour assembler des matériaux, et en particulier des alliages d'aluminium. Cependant, différents paramètres du processus de soudage (choix de l'outil, ses vitesses de rotation et d'avancement, etc.) peuvent impacter la tenue mécanique du joint soudé. Ainsi, il est nécessaire voire primordial de disposer d'outils de diagnostic et de pronostic pour analyser la durabilité mécanique de l'assemblage. Cet article présente les résultats expérimentaux obtenus en laboratoire et qui permettent de mettre en évidence la relation entre les paramètres de soudage et la tenue mécanique de l'assemble soudé. Les éprouvettes, constituées de trois tôles d'aluminium soudées, ont été sollicitées en traction monotone. Le comportement mécanique du joint soudé a été analysé au moyen de deux instrumentations : la corrélation d'images numériques et l'émission acoustique. Cette analyse couplée a permis d'identifier la signature acoustique d'un mécanisme de fissuration fortement corrélé à l'endommagement de l'assemblage soudé.

Abstract:

Friction Stir Welding (FSW) process has found many engineering applications such as automobile, aircraft and aerospace industries, as it can weld low density material like aluminum. However, weld quality is affected because of welding process parameters (rotational speed, welding speed, geometry of the pin, etc.). This paper presents laboratory experimental results that highlight the influence of welding process parameters on the mechanical behavior of the assembly. Non-destructive monitoring of damage evolution within welded assembly becomes an essential tool to better understand its mechanical behavior, and therefore to prevent failure risks of engineering structures that involve welding matters. In this work, digital image correlation (DIC) and acoustic emission (AE) were used

to identify failure mechanisms that govern the damage of the welded joint. Results, based on an unsupervised classification of AE sources, shows that monitoring a particular failure mechanism can help anticipate fracture of the assembly.

Mots clefs : Soudage FSW, Assemblage soudé, Emission acoustique, Corrélation d'images numériques, mécanismes de fissuration

1 Introduction

Depuis l'invention brevetée en 1991 du procédé de soudage par friction malaxage par l'institut de soudage TWI (The Welding Institute), cette technologie, plus connue sous son acronyme anglais FSW (Friction Stir Welding), est largement adoptée dans l'industrie des transports pour assembler des matériaux, et en particulier des alliages d'aluminium qui étaient jusqu'alors difficilement soudables avec les techniques classiques (MIG, MAG, TIG, etc.). Le soudage par FSW (Figure 1-A) [1] est un procédé de soudage à l'état solide, et présente plusieurs avantages majeurs : absence de métal d'apport, de gaz de protection, de consommables, et soudage à des températures inférieures aux températures de fusion des métaux à assembler ; réduction de masse des assemblages soudés comparés à ceux rivetés ; limitation des concentrations de contraintes au niveau des perçages et qui sont préjudiciables à la tenue en fatigue des structures ainsi assemblées. Plusieurs travaux ont été menés pour analyser l'influence des paramètres du procédé de soudage sur les caractéristiques micro-structurales, thermiques, et mécaniques des assemblages afin d'améliorer la qualité des soudures. En particulier, la technique de suivi par émission acoustique couplée à la corrélation d'images numériques [2] a été utilisée pendant le processus de soudage pour détecter les moindres défauts susceptibles de réduire la tenue mécanique de l'assemblage. D'autres méthodes de contrôle non destructif (ultrasons, radiographie, etc.) [3], [4] ont également été utilisées pour analyser la qualité du cordon de soudure.

Le présent projet de recherche s'intéresse à l'optimisation des paramètres de soudage FSW (vitesse de rotation et d'avancement du pion) en analysant leur influence sur le comportement mécanique de l'assemblage soudé de trois tôles d'aluminium de nuances 7075, 2042 et 6082. Six configurations d'assemblage soudé sont testées pour analyser leur comportement mécanique en traction monotone. Deux techniques d'instrumentation (corrélation d'images numériques et émission acoustique) sont utilisées pour analyser finement les mécanismes de fissuration de l'assemblage soudé. La corrélation d'images numériques a été utilisée pour analyser simultanément les champs de déformation sur deux plans perpendiculaires (tranche et la face principale). L'émission acoustique a été utilisée (capteurs positionnés sur l'autre face, parallèle à la principale) pour détecter, localiser et suivre en temps réel l'apparition de fissure dans le volume de l'assemblage soudé. Une classification non supervisée a été appliquée pour proposer différentes signatures acoustiques, et les associer à différents mécanismes de fissuration en s'appuyant sur l'analyse couplée activité acoustique – corrélation d'images numériques.

2 Procédure expérimentale en laboratoire

Cette section détaille le protocole expérimental mis en place en laboratoire pour d'une part caractériser la tenue mécanique de l'assemblage soudé et d'autre part identifier les mécanismes de fissuration qui gouvernent l'endommagement du joint. L'éprouvette est soumise à une sollicitation de traction monotone. Une instrumentation optique et un suivi de l'activité acoustique permettent d'analyser finement le comportement mécanique du joint soudé.

2.1 Préparation des éprouvettes

Trois tôles en aluminium de nuances 7075, 2024 et 6061 (Figure 1-B), de dimensions en plan 250 x 200 mm² et d'épaisseur 2 mm (Figure 1-C/D) sont soudées par friction malaxage. Le dispositif industriel de soudage fait intervenir un outil composé d'un poinçon avec épaulement et d'un pion. Lors du soudage, cet outil tourne tout en exerçant une pression à la surface des plaques (Figure 1-A). Le frottement de l'outil avec les plaques et la déformation plastique importante du matériau fortement malaxé par l'outil génèrent de la chaleur et un ramollissement du métal [5].

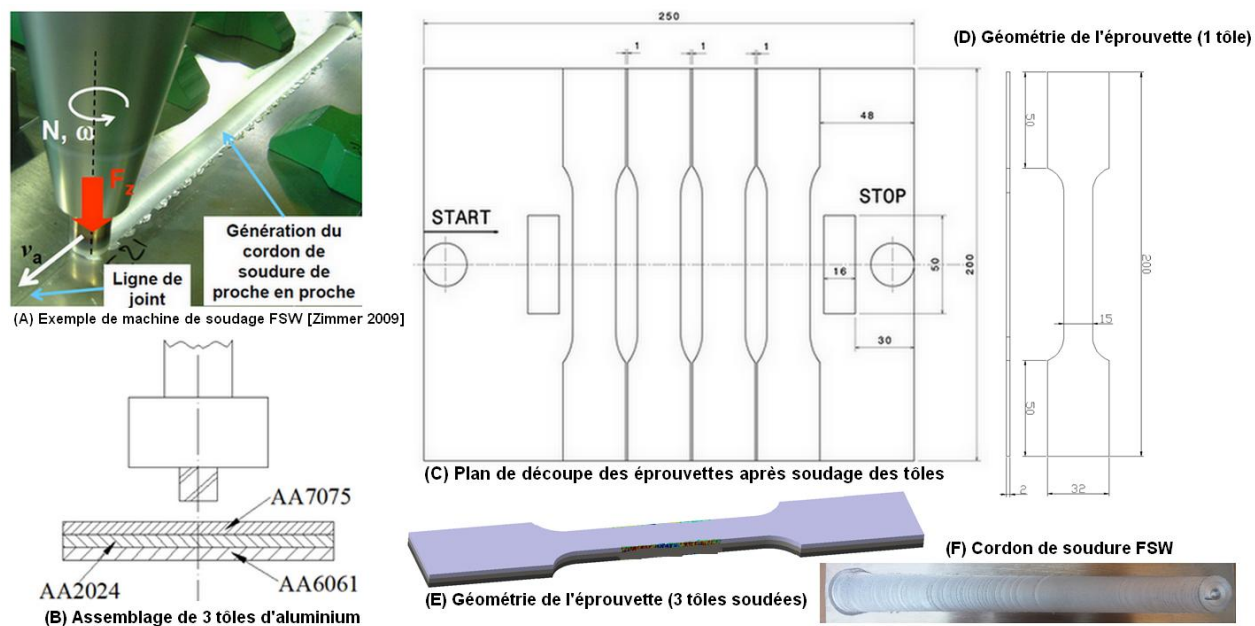


Figure 1. Protocole de soudage par FSW des tôles d'aluminium et usinage des éprouvettes

Dans ce projet de recherche, l'optimisation des paramètres du procédé de soudage FSW passe entre autres par l'analyse de l'influence des vitesses de rotation et d'avancement de l'outil de soudage sur la tenue mécanique de l'assemblage. Ainsi, six couples de vitesses ont été testés, et dans le présent article nous nous limiterons à l'analyse de deux couples (Tableau 1). Pour chaque configuration de soudage, quatre éprouvettes sont découpées perpendiculairement au joint soudé (Figure 1-C/E). Leur géométrie suit la norme ISO 6892-1 (Figure 1-D).

Tableau 1. Configurations de soudage FSW selon les vitesses du pion

Configuration	Vitesse de rotation [tr/min]	Vitesse d'avancement [mm/min]
P-41	650	60
P-43	650	100

2.2 Techniques de caractérisation

La sollicitation des éprouvettes en traction monotone est assurée par une machine d'essai hydraulique INSTRON 1342 (Figure 2-C) équipée d'une cellule de force de capacité +/- 100 kN. Les essais sont pilotés en déplacement avec une vitesse de traverse de 0,5 mm/min.

Couplé et synchronisé avec cette sollicitation mécanique, un système de caméras CCD (Figure 2-B) est mis en place pour évaluer les champs de déplacements, et par dérivation ceux de déformations, au voisinage du joint soudé et sur deux faces perpendiculaires (latérale et frontale). Le système GOM (capteur CCD de 2448×2050 pixels²) analyse la face frontale, et la caméra Retiga 6000 (capteur CCD de 2758×2208 pixels²) analyse la face latérale de l'éprouvette. Le codage aléatoire (mouchetis, Figure 2-A) est réalisé sur ces deux faces perpendiculaires, sur une longueur de 40 mm centrée sur le joint de soudure.

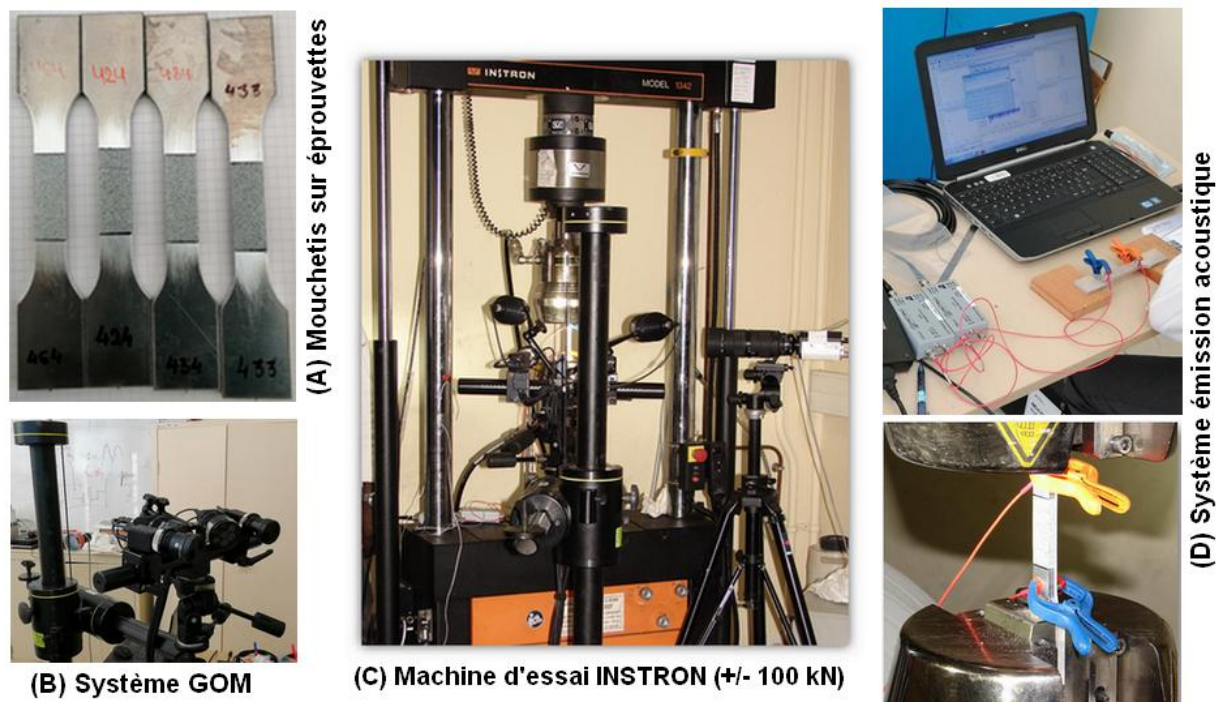


Figure 2. Caractérisation en laboratoire du comportement mécanique de la soudure FSW

La technique de suivi par émission acoustique a également été mise en place et synchronisée avec la sollicitation mécanique et l'instrumentation optique. Elle permet de détecter, de localiser et de suivre l'activité acoustique générée par les modifications de microstructure de l'éprouvette, et en particulier celle du joint soudé. Deux capteurs piézoélectriques sont positionnés sur l'éprouvette à ± 40 mm du joint de soudure et maintenus fixes (Figure 2-D) tout au long de l'essai ; ils transmettent à la chaîne d'acquisition les vibrations qui naissent dans le volume de l'éprouvette. Les calibrations vis-à-vis de l'environnement d'essai et du matériau nous ont conduits à fixer le seuil d'acquisition à 50 dB, et à 5000 m/s la vitesse de propagation des ondes.

3 Comportement mécanique de l'assemblage soudé FSW

Dans cette section, l'influence des paramètres de soudage FSW sur la tenue mécanique du joint soudé est analysée. Une analyse plus approfondie de l'activité acoustique pendant l'essai de traction permet de proposer les différents mécanismes qui accompagnent l'endommagement du joint soudé. L'analyse couplée activité acoustique – cartographie des champs de déformations permet d'identifier la signature acoustique d'un mécanisme de fissuration, et qui de par sa localisation et de son évolution, peut nous indiquer bien en amont la zone où s'initiera la rupture de l'assemblage

3.1 Comportement macroscopique

Les courbes macroscopiques (force en fonction du temps) pendant l'essai sont présentées et analysées (Figure 3 et Figure 4). Nous observons une dispersion qui croît avec la vitesse d'avancement du pion.

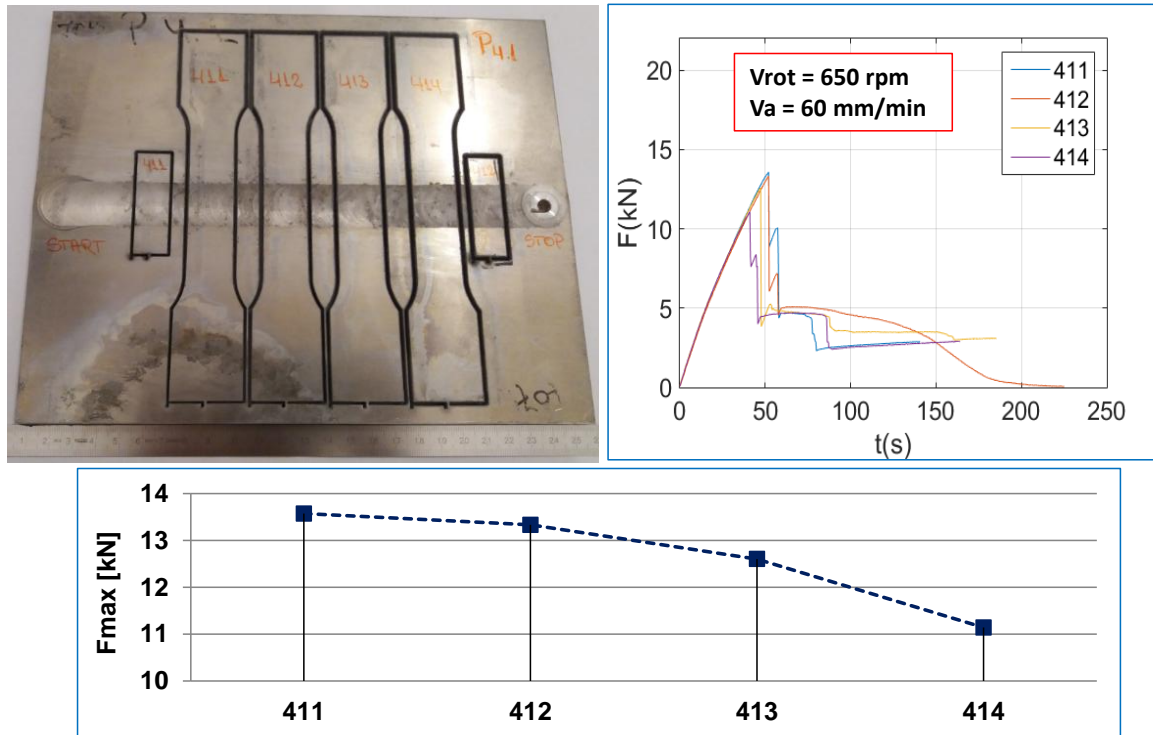


Figure 3. Influence des paramètres de soudage sur la tenue mécanique de l'assemblage (P-41)

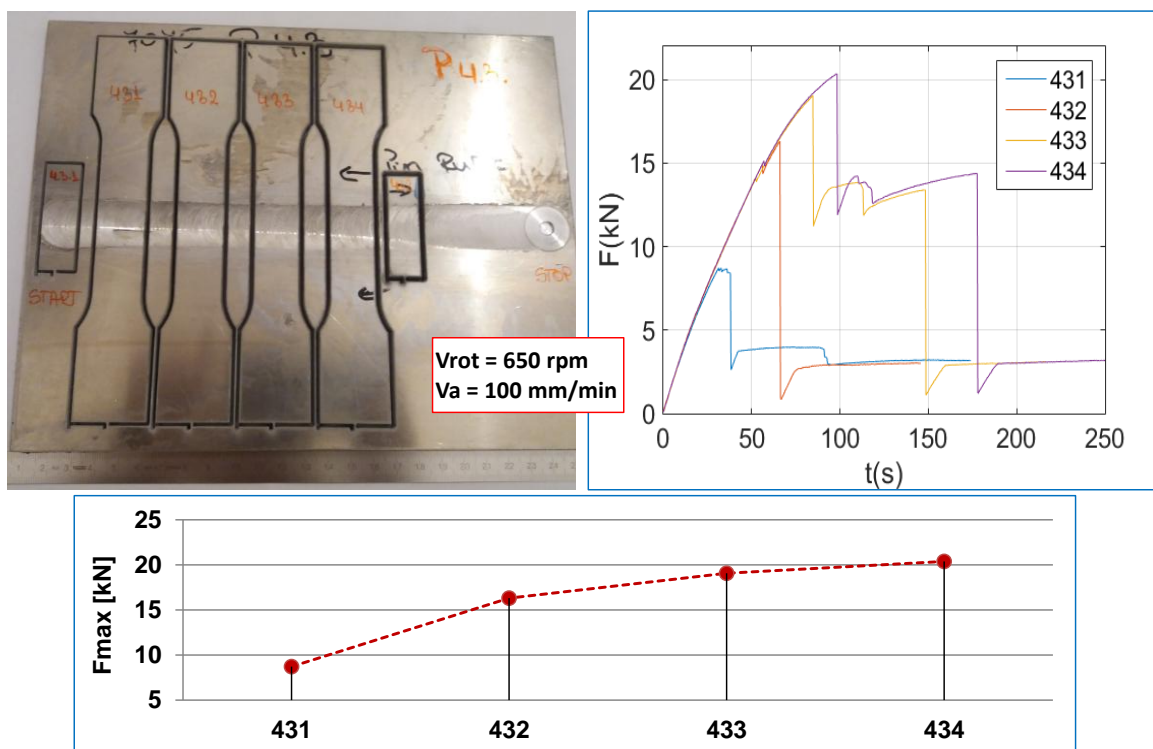


Figure 4. Influence des paramètres de soudage sur la tenue mécanique de l'assemblage (P-43)

Notons cependant que les éprouvettes sont prélevées assez loin du début du processus de soudage pour la configuration P-41 et très proche de la zone de début de soudage pour la configuration P-43. Une non stabilisation de la température de soudage pourrait expliquer cette dispersion observée (Figure 4). De plus, nous notons que les forces à rupture des éprouvettes d'une même configuration d'assemblage (Figure 3 et Figure 4) varient considérablement, et dans des sens opposés.

Pour tenter d'expliquer ces variations si importantes de force à rupture à la fois entre les éprouvettes d'une même configuration et entre différentes configurations, nous allons analyser de manière fine les champs cinématiques au voisinage du cordon de soudure. Ces analyses post-ruptures seront comparées aux mécanismes de fissuration qui ont été détectés par l'émission acoustique.

3.2 Analyse des mécanismes de fissuration

Pour une compréhension plus fine du comportement mécanique de l'assemblage soudé, l'activité acoustique générée pendant l'essai de traction monotone est analysée aux moyens d'outils statistiques qui permettent une classification non supervisée des sources acoustiques [6].

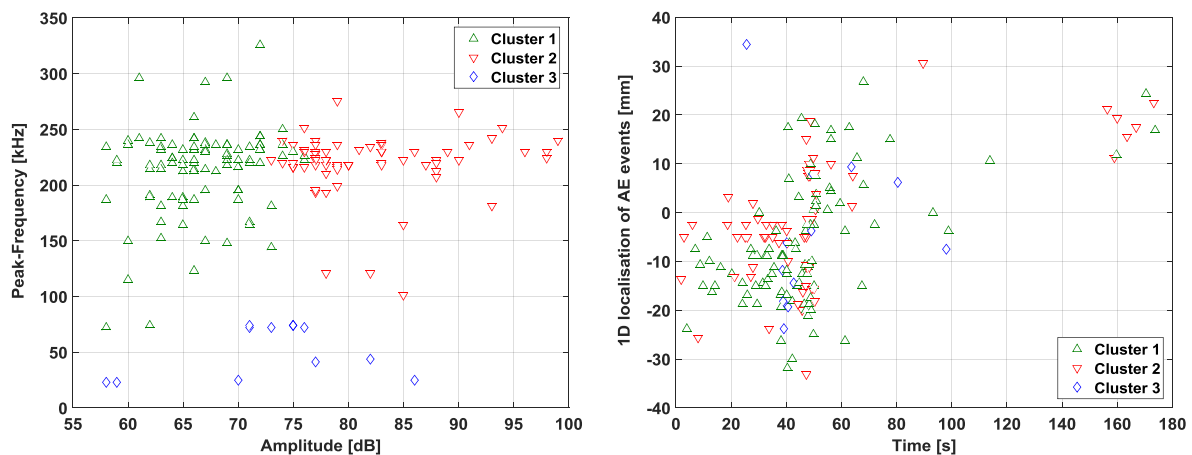


Figure 5. Mécanismes de fissuration (412) : signatures acoustiques (à gauche) et localisation des sources pendant l'essai (à droite)

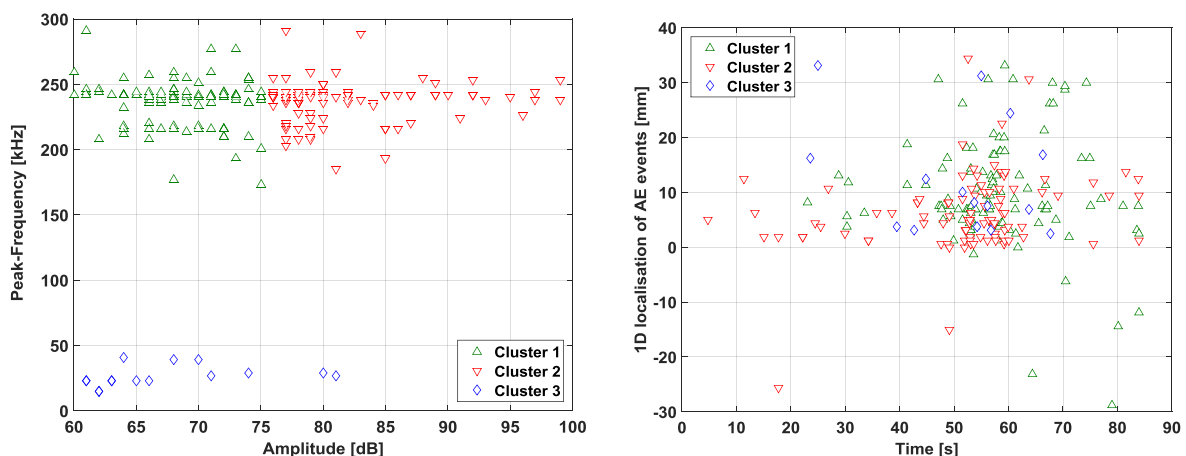


Figure 6. Mécanismes de fissuration (433) : signatures acoustiques (à gauche) et localisation des sources pendant l'essai (à droite)

La classification non supervisée des sources acoustiques s'appuie sur l'algorithme kmeans++. Pour deux éprouvettes prélevées dans chacune des deux configurations de soudage (P-41 et P-43), les résultats conduisent à une classification optimale des sources acoustiques en trois clusters (familles) avec des signatures acoustiques clairement identifiables par les valeurs de fréquence pic et d'amplitude du signal. En comparant les signatures acoustiques (Figure 5 et Figure 6), nous remarquons que deux mécanismes de fissuration (Cluster 1 et Cluster 2) peuvent être différenciés selon que l'amplitude de leur signal acoustique est supérieure ou inférieure à 75 dB, et lorsque la fréquence pic est supérieure à 100 kHz. L'identification claire des signatures acoustiques des différents mécanismes de fissuration permet, dans un protocole d'évaluation et de diagnostic, de les intégrer dans des filtres afin de ne se focaliser que sur ces sources acoustiques (précurseur d'un endommagement critique, macro-rupture, etc.).

L'analyse statistique de l'activité acoustique a également permis, en s'appuyant sur une localisation linéaire des sources acoustiques, de suivre la cartographie des différents mécanismes de fissuration et leurs évolutions pendant l'essai. Nous notons ainsi que la configuration P-41 (Figure 5) conduit à une localisation des sources acoustiques dans tout le cordon de soudure, alors que la configuration P-43 (Figure 6) conduit à une localisation des sources acoustiques dans la moitié supérieure du joint soudé.

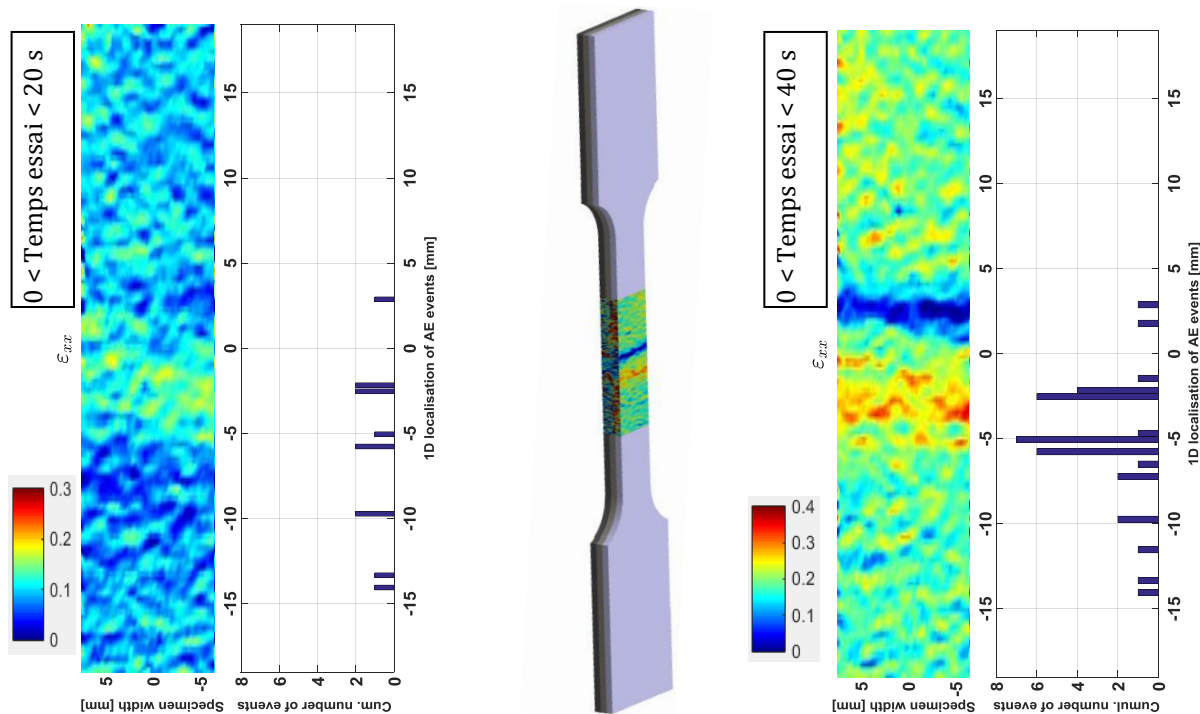


Figure 7. Comparaison entre la cartographie de la déformation longitudinale et l'activité acoustique (Cluster 3) dans l'assemblage soudé FSW (412)

Les champs de déformations issus de la corrélation d'images numériques ont été analysés et comparés à l'activité acoustique générée par le mécanisme de fissuration associé au Cluster 3 (Figure 7). Cette analyse a porté d'une part sur le cumul du nombre de sources acoustiques localisées dans différentes tranches de volume du joint et au bout d'une durée d'essai (0 à 20 secondes, puis 0 à 40 secondes), et d'autre part sur la cartographie du champ de déformation longitudinale ϵ_{xx} (face frontale). Les résultats montrent que les valeurs maximales de déformation longitudinale sont localisées dans la moitié inférieure du joint soudé, et cette observation est bien en adéquation avec la localisation des sources acoustiques (Figure 5 et Figure 7). Nous notons également que le mécanisme de fissuration à la base

des sources acoustiques du Cluster 3 permet d'identifier en temps réel la zone du joint qui subit de grandes valeurs de déformation (tranche de 5 mm en dessous de l'axe neutre du joint soudé).

L'influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur le comportement mécanique du joint soudé s'appuiera sur la cartographie et l'évolution des mécanismes de fissuration caractérisés par des signatures acoustiques telles que définies par le Cluster 3.

4 Conclusions et perspectives

Dans ce travail, l'influence des paramètres du procédé de soudage par friction malaxage (FSW) sur la tenue mécanique du joint soudé a été étudiée en laboratoire. Différentes configurations de soudage, en faisant varier les vitesses de rotation et d'avancement, ont été appliquées pour assembler trois tôles d'aluminium. Des essais de traction monotone ont été réalisés et couplés à une méthode optique (corrélation d'images numériques) et à l'émission acoustique. Dans cet article, deux configurations de soudage ont été comparées. Les courbes macroscopiques du comportement mécanique mettent clairement en évidence l'influence de la vitesse d'avancement du pion, une dispersion sur les valeurs de force à rupture a été notée malgré que les éprouvettes aient été soudées avec la même configuration. Une non stabilisation de la température de soudage pourrait expliquer cette dispersion observée.

L'activité acoustique générée pendant l'essai de traction monotone est analysée aux moyens d'outils statistiques qui permettent une classification non supervisée des sources acoustiques. La classification non supervisée des sources acoustiques s'appuie sur l'algorithme kmeans++. Les résultats conduisent à une classification optimale des sources acoustiques en trois clusters (familles) avec des signatures acoustiques clairement identifiables par les valeurs de fréquence pic et d'amplitude du signal.

L'analyse couplée (corrélation d'images numériques et émission acoustique) a permis de montrer que le mécanisme de fissuration à la base des sources acoustiques du Cluster 3 permet d'identifier en temps réel la zone du joint qui subit de grandes valeurs de déformation. Dans l'analyse ultérieure des autres configurations d'assemblage, l'influence des paramètres du procédé de soudage FSW sur le comportement mécanique du joint soudé s'appuiera sur la cartographie et l'évolution des mécanismes de fissuration caractérisés par des signatures acoustiques telles que définies par le Cluster 3

Références

- [1] S. Zimmer, L. Langlois, J. Laye, J.C. Goussain, P. Martin, R. Bigot, Démarche pour le choix et/ou la conception d'un moyen de soudage par FSW, 19^e Congrès Français de Mécanique, Marseille, France, 2009.
- [2] V. Murthy, U. Kalmeshwar, B.M. Rajaprakash, et al., Study on influence of concave geometry shoulder tool in Friction Stir Welding (FSW) by using Image Processing and Acoustic Emission Techniques, Materials Today Proceedings 5(2018) 27004–27017
- [3] V. Joshi, K. Balasubramaniam, R.V. Prakash, Study of defects in friction stir welded AA 5083 by radiography, ultrasonic and phased array ultrasonic technique, Proceedings of the national seminar and exhibition on non-destructive evaluation 2011.
- [4] R. Ranjan, A.R. Khan, C. Parikh, et al., Classification and identification of surface defects in friction stir welding: An image processing approach, J. Manuf. Process 22(2016) 237–253
- [5] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, Friction stir welding for the transportation industries, Materials & Design 18(1997) 269-273.

- [6] M. Diakhate, E. Bastidas-Arteaga, R. Moutou Pitti, F. Schoefs, Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material: Towards a real-time monitoring of crack tip propagation, *Engineering Fracture Mechanics* 180(2017) 254–67.