

Compréhension des mécanismes de mélange dans le procédé de soudage par friction-malaxage : investigation expérimentale et numérique

Eliza Roxana Oprescu

ENSTA Bretagne et Institut de recherche Dupuy de Lôme
UMR CNRS 6027

Brest, France

Université Nationale de Science et Technologie POLITEHNICA

Bucarest, Centre Universitaire Pitesti

Pitesti, Roumanie

eliza.oprescu@ensta-bretagne.org

Malick Diakhate

Univ. Bretagne Occidentale et Institut de recherche Dupuy de Lôme

UBS – UBO - ENSTA Bretagne - ENIB, UMR CNRS 6027

Brest, France

malick.diakhate@univ-brest.fr

Claudiu Bădulescu

ENSTA Bretagne et Institut de recherche Dupuy de Lôme
UBS – UBO - ENSTA Bretagne - ENIB, UMR CNRS 6027

Brest, France

claudiu.badulescu@ensta-bretagne.fr

Eduard Laurențiu Nițu

Département de Fabrication et Management Industriel

Université Nationale de Science et Technologie POLITEHNICA

Bucarest, Centre Universitaire Pitesti

Pitesti, Roumanie

eduard.l.nitu@upb.ro

Résumé — Ce travail vise à proposer une stratégie expérimentale impliquant la tomographie à rayons X et la simulation numérique de type SPH (Smoothed-particle hydrodynamics) afin de caractériser les mécanismes de mélange dans un joint soudé obtenu par friction malaxage. Deux types d'échantillons ont été fabriqués en superposant et en soudant ensemble trois tôles d'alliage d'aluminium de nuances AA6061, AA7075 et AA2024. Tout d'abord, la distribution de la matière après soudage, mais également les défauts de la structure interne du joint ont été identifiés à l'aide de la tomographie aux rayons X. Les premiers résultats obtenus après une segmentation classique, basée sur l'algorithme d'Otsu, mettent en évidence la manière dont la matière se mélange, permettant ainsi de détecter qualitativement et quantitativement l'intensité du degré de mélange. On note au passage que les données tomographiques traitent uniquement l'état final du joint. Alors, pour mieux appréhender le processus de mélange, une simulation lagrangienne, basée sur le principe de maillage libre a permis de montrer qu'il est possible de déterminer le flux de la matière lors du procédé de soudage. Les premiers résultats ont permis de suivre l'évolution spatiale de la matière ainsi mélangée tout en obtenant le champ de température sous des conditions adiabatiques. Ces résultats ouvrent la possibilité de déterminer i) le degré de mélange et ii) le volume disloqué autour du pion, les paramètres clés caractérisant la qualité du mélange.

Mots-clés — soudage, friction-malaxage, tomographie aux rayons X, simulation numérique, SPH, particules.

I. INTRODUCTION

Aujourd'hui, le principal défi consiste à réduire la consommation d'énergie dans les différents secteurs économiques. La conversion de l'énergie affecte considérablement notre environnement et entraîne des niveaux élevés de pollution de l'air. À titre d'exemple, le transport est l'activité qui contribue le plus aux émissions de gaz à effet de serre en France puisqu'il a été estimé être responsable en 2019 d'environ 31% de l'ensemble des émissions [1]. Sur la base de cette observation, la conception des structures mécaniques dans l'industrie du transport devrait conduire à un rapport résistance/poids élevé [2]. En effet, l'utilisation de ces structures est un moyen efficace pour réduire le poids total des futurs véhicules, améliorant ainsi l'efficacité énergétique tout en réduisant la consommation de carburant [3].

Ces structures sont obtenues par assemblage de différents matériaux qui se caractérisent à la fois par leur légèreté et leur grande résistance mécanique. Ces matériaux sont généralement difficiles à souder au moyen de méthodes traditionnelles et sont donc traditionnellement assemblés par rivetage, boulonnage ou vissage. L'un des inconvénients de ces procédés d'assemblage est qu'ils augmentent le poids de l'assemblage. Une alternative à ces procédés d'assemblage est la technique de soudage par friction-malaxage (FSW). Cette dernière a été inventée et brevetée par *The Welding Institute* (TWI) [4]. Il s'agit d'un soudage à l'état solide

caractérisé par une faible production de chaleur et une température de soudage inférieure à la température de fusion des matériaux à assembler.

Durant les deux dernières décennies, cette technique de soudage a fait l'objet de plusieurs études expérimentales, mais également numériques. Les objectifs sont très variés, allant de l'identification de paramètres optimaux de processus à la compréhension de la microstructure du joint ainsi obtenu et l'effet que cela peut avoir sur la résistance mécanique d'un tel joint.

Néanmoins, peu d'études ont abordé la manière dont la matière est mélangée durant le processus de soudage. Ces tâches sont relativement difficiles à réaliser, car suivre expérimentalement le mouvement du flux de la matière autour de l'outil de soudage reste une tâche très complexe. En parallèle, il est souhaitable de développer des modèles de simulation capable d'estimer l'écoulement de la matière autour du pion. Ces types de simulation pourraient également apporter des réponses sur le degré de mélange pour le soudage de matériaux dissimilaires.

Cet article a pour objectif de présenter quelques résultats préliminaires sur la stratégie d'investigation de la manière dont deux alliages d'aluminium se mélangent durant le procédé de soudage par friction - malaxage, en utilisant la tomographie aux rayons X. Ces résultats ont été obtenus durant mes études doctorales articulées autour d'une thèse en cotutelle entre *l'Université Nationale de Sciences et Technologies* POLITEHNICA de Bucarest – Centre Universitaire Pitesti (CUPIT), en Roumanie et *l'École Nationale de Techniques Appliquées de Bretagne* (ENSTA Bretagne), à Brest, en France. Plus précisément, au moyen de joints tri couches existants et soudés en Roumanie, nous avons pu mettre en place une stratégie d'investigation tomographique aux rayons X afin d'observer l'état final du joint, mais surtout la manière dont la matière est mélangée avec un outil dont la partie active est cylindrique et filetée. Les défauts engendrés sont également détectés et caractérisés. Enfin une stratégie de modélisation et simulation numérique de type SPH (*Smooth particle hydrodynamics*) a été proposée, permettant ainsi d'estimer l'évolution spatiale de la matière au cours du procédé de soudage.

II. MATERIAUX ET METHODES D'INVESTIGATION

La figure 1-c donne un aperçu de la forme de l'échantillon étudié ainsi que de la taille des zones investiguées. Dans cette étude, trois tôles d'alliage d'aluminium de nuances AA6061, AA7075 et AA2024 ont été superposées de deux manières différentes : *i)* AA6061, AA7075 et AA2024 et *ii)* AA7075, AA2024 et AA6061 ; et soudées ensemble, en utilisant le procédé de soudage par friction malaxage. Les propriétés mécaniques ainsi que la température de fusion de chacune des trois tôles d'alliage d'aluminium [5] sont indiquées dans le

tableau 1.

TABEAU I. PROPRIETES MECANQUES DES 3 ALLIAGES D'ALUMINIUM

Alliage	Température de fusion T_f [°C]	Résistance mécanique σ_m (MPa)	Allongement à rupture ε_m (%)	Masse volumique ρ (kg/m ³)
AA7075	635	590	12	2810
AA6061	585	120	22	2700
AA2024	500	465	17	2773

L'outil de soudage utilisé pour assembler les trois tôles d'alliage est fabriqué en acier fortement allié P20+S(40 CrMnMoS 8-6). La tige est un filet M6 et sa longueur de 5,3 mm couvre 85% de l'épaisseur de l'échantillon à souder. Le diamètre de l'épaulement de l'outil de 22 mm était suffisant pour générer la chaleur nécessaire à l'assemblage des trois tôles à l'aide d'une machine FSW. Les paramètres cinématiques utilisés dans cette étude sont les suivants : $v_r = 1400$ rpm (vitesse de rotation) et $v_a = 70$ mm/min (vitesse d'avancement).

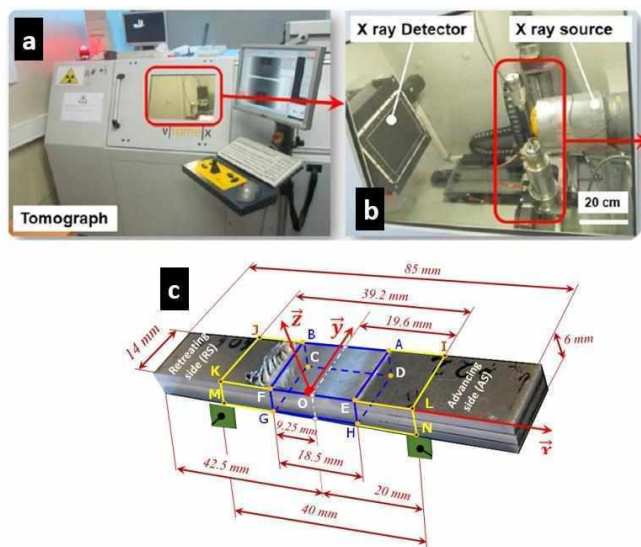


Fig. 1. Equipement tomographique et échantillon analysé.

La μ -tomographie (μ CT) est une technique d'imagerie qui permet d'avoir une vue d'ensemble de la structure interne d'un échantillon, sans causer de dommages. La capacité non destructive de cette technique est un avantage significatif pour la science des matériaux, en particulier lors de l'analyse *in situ*, comme l'ont expérimenté avec succès Buffière et al [6]. L'équipement de tomographie par rayons X (modèle Phoenix vTomeX / X-ray, voir Figure 1) qui a été utilisé au cours de cette étude expérimentale se trouve dans le laboratoire MATEIS (INSA de Lyon, en France). L'analyse de l'éprouvette FSW a nécessité l'utilisation de rayons X incidents caractérisés par une tension de 80 kV et une intensité de 280 μ A sans aucun filtrage pour obtenir le meilleur compromis entre transmission et contraste. Le détecteur de rayons X Varian Paxscan utilisé dans cette étude a une surface active de 200 mm $\times$ 250 mm et une matrice de 1920 $\times$ 1536 pixels². Ce détecteur enregistre des radiogrammes qui sont codés en niveaux de gris, avec une profondeur de gris égale à 14 bits. La taille du volume reconstruit est de 1500 $\times$ 1000 $\times$ 500 voxels³ et la taille d'un voxel après reconstruction est égale à 18 $\times$ 18 $\times$ 18 μ m³. L'acquisition des données a été réalisée en utilisant la procédure suivante : 912 projections de rayons X ont été considérées pendant la rotation de 360 degrés de l'échantillon et le temps d'exposition pour chaque position angulaire était égal à 333 ms. Les images 3D résultantes ont été reconstruites à l'aide d'un algorithme de rétroprojection filtrée.

En complément aux investigations expérimentales, des simulations numériques ont été réalisées pour évaluer l'effet des

différents paramètres du procédé FSW sur la qualité des joints FSW. La modélisation du procédé FSW est une tâche difficile, car elle doit traiter un problème multiphysique caractérisé par une déformation plastique importante et une température élevée. L'écoulement de la matière à proximité de l'outil est encore plus difficile à modéliser. Aujourd'hui, plusieurs stratégies de simulation numérique sont proposées pour modéliser le soudage FSW. Dans les modèles non basés sur l'écoulement, des déformations excessives apparaissent et conduisent à une interruption prématurée du calcul. La formulation ALE est souvent utilisée pour garantir une meilleure qualité de maillage pendant la simulation [7, 8]. Toutefois, en raison des déformations extrêmement importantes, cette stratégie ne peut pas éliminer la distorsion du maillage et entraîne par conséquent un temps de calcul prohibitif. Récemment, des modèles éléments finis (MEF) couplés avec une approche eulérienne-lagrangienne (CEL) ont été développés pour simuler des déformations plastiques importantes [8]. Les modèles CEL sont à l'origine utilisés pour décrire la réponse thermomécanique (forces et distribution de la température).

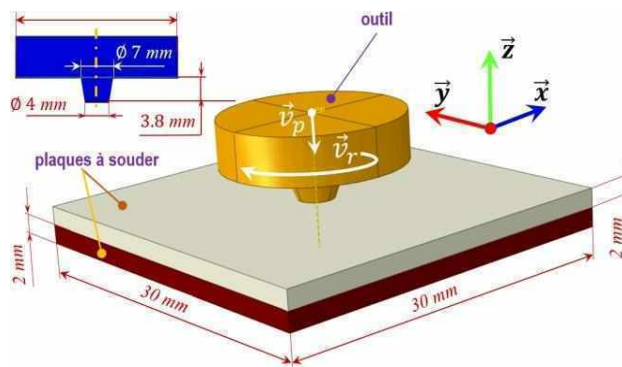


Fig. 2. Modèle SPH pour la simulation numérique de la phase de pénétration I du procédé de soudage FSW

Afin de pallier aux limitations de la MEF sur certaines applications impliquant la dynamique rapide, on propose alors la méthode SPH comme une alternative à la méthode des éléments finis, se positionnant comme un outil de simulation efficace. En effet, la méthode SPH se démarque de celle des éléments finis grâce aux avantages suivants : i) absence de connectivités fixes entre les nœuds, ce qui supprime les effets indésirables de la MEF (distorsion du maillage) ; ii) meilleure visualisation de la distribution des contraintes ; iii) aptitude à intégrer l'histoire du matériau dans chaque particule (approche lagrangienne) ; iv) aptitude à interagir avec des matrices à géométrie complexe ; v) reproduction de la physique.

Les deux pièces à souder sont représentées par deux plaques de forme carrée, de côté 30 mm, avec une épaisseur de 2 mm chacune, comme le montre la figure 2. La géométrie de l'outil a une forme conique avec des diamètres de 7 mm à sa base et de 4 mm à sa partie supérieure et une longueur de 3,8 mm (Figure 2). L'outil est considéré comme rigide et les pièces déformables. Toutes les faces latérales et inférieures du domaine eulérien sont encastrées. L'outil est caractérisé par deux mouvements : la rotation à une vitesse constante (v_r) de 1400 rpm, couplée à une vitesse de pénétration (v_p) de 4,3 mm/s. Le temps de la simulation est de 0,88 s. Ces paramètres sont choisis pour diminuer le temps du calcul lors des investigations préliminaires tout en gardant la mise en évidence de différents mécanismes régissant le procédé de soudage. 32500 particules ont été générées pour avoir une discrétisation des deux plaques suffisamment fines.

Le modèle de Johnson-Cook est utilisé pour décrire l'écoulement des matériaux.

$$\sigma_{JC} = [A + B(\dot{\epsilon}_p)^n][1 + C \ln(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_0})] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r} \right)^m \right] \quad (1)$$

Ce modèle découple les comportements plastiques, visqueux et thermiques et décrit chacun d'entre eux par trois termes indépendants tels qu'ils sont présentés à l'équation 1, où σ est la contrainte d'écoulement ; $\dot{\epsilon}_p$ est la déformation plastique effective ; $\dot{\epsilon}_0$ est le taux de déformation normalisé ; A, B, C, n, T_f et m sont des constantes du matériau ; T_r est la température ambiante (22°C dans cette étude). Les constantes du matériau ont été déterminées sur la base des résultats d'essais de traction effectués à différentes vitesses (0.35 mm.min⁻¹, 7 mm.min⁻¹ et 35 mm.min⁻¹) et températures (22 °C, 200 °C et 400 °C). Pour l'instant, l'implémentation de l'approche SPH dans le logiciel Abaqus ne permet pas l'utilisation simultanée de deux ou plusieurs matériaux. Alors pour ces premiers résultats nous avons utilisé un seul matériau, à savoir l'alliage AA 7075 avec les paramètres identifiés et présentés dans le tableau 2.

TABLEAU II. PARAMÈTRES DE JOHNSON-COOK DÉTERMINÉS

A [MPa]	B [MPa]	n	C	m	T _r [°C]	T _r [°C]	$\dot{\epsilon}_0$ [s ⁻¹]
512,1	392,5	0,452	0,00195	0,54	635	22	0,00365

Le coefficient de frottement entre l'outil et les plaques à souder est supposé ici constant et égale à 0.3.

III. RESULTATS

Le volume de l'échantillon étudié par μ -tomographie aux rayons X est illustré sur la figure 1. Il est représenté par le parallélépipède bleu (ABCDEFGH) centré sur le plan médian. La taille de ce volume a été choisie pour identifier des défauts de taille relativement petite (taille du voxel dans la reconstruction = 18 μ m) mais aussi la morphologie du mélange d'alliages fondus. Les étapes de traitement des données décrites ci-dessous ont été appliquées au volume reconstruit. Tout d'abord, la qualité de ce dernier a été améliorée par l'utilisation d'un filtre médian 3D de taille 3 $\times$ 3 $\times$ 3 voxels³. Cela permet de réduire le niveau de bruit qui pourrait affecter les différentes étapes du seuillage et de la segmentation. Ensuite, pour analyser l'ensemble du volume et ne pas être dépendant de la mémoire vive, l'encodage du volume a été réduit de 14 à 8 bits. La perte d'information consécutive à ce recodage n'a pratiquement pas eu d'effet sur la qualité des phases détectées. Pour illustrer cela, la figure 3 montre cinq sections parallèles à la face FEHG (figure 1) pour différentes valeurs de y. Le niveau de gris moyen pour une profondeur de gris de 8 bits est de 99,5, 136,1 et 120,7, pour les alliages AA6061, AA7075 et AA2024, respectivement. Cette différence est en bon accord avec la variation de densité de chaque alliage, comme le montre le tableau 1. En effet, la densité est légèrement différente pour chaque alliage soudé. C'est un grand avantage pour comprendre pleinement le mélange de ces trois matériaux.

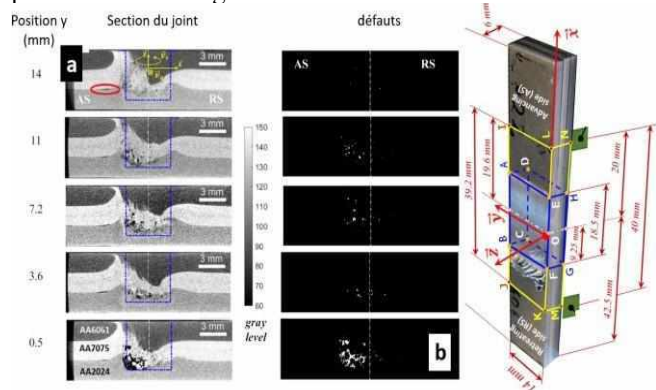


Fig. 3. Distribution de différents alliages dans l'échantillon soudé, et déterminé par analyse tomographique.

Plus précisément, on peut observer la distribution spatiale des trois alliages au voisinage de l'outil. On constate que les alliages AA6061 et AA7075 sont bien mélangés. Quelques défauts de type pores sont visibles à l'interface entre les deux alliages. Ces défauts sont situés dans le sens du soudage. Des défauts d'accrochage sont également observés. Cela conduit à un soulèvement de l'interface entre les deux tôles. Ces défauts d'accrochage sont générés par la translation du matériau à l'état pâteux. Cette translation est provoquée par l'outil de soudage fileté.

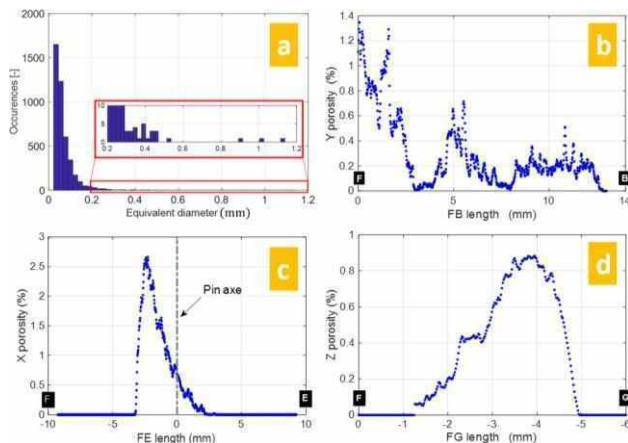


Fig. 4. Histogramme des défauts et leur distribution spatiale dans l'échantillon.

La distribution de diamètres de 4275 pores identifiés dans le joint est représentée sur la figure 4-a. Seuls les pores ayant un diamètre supérieur à 60 μ m sont pris en compte dans cet histogramme. Des fluctuations significatives du diamètre équivalent des défauts peuvent être observées.

La figure 4-c montre l'évolution de la porosité X (x). Le suivi de cette porosité fournit des informations utiles pour comprendre l'évolution de la section réelle du joint dans la direction x. Tout d'abord, on constate que les pores sont principalement localisés le long d'un segment qui est presque centré (± 3 mm) autour de l'emplacement de l'axe de l'outil de soudage, le long d'une zone qui est plus grande que le diamètre du pion. La zone la plus affectée par les pores est située du côté de retrait à une distance d'environ 3 mm de l'axe du pion.

À cet endroit, la section transversale de l'échantillon est réduite d'un peu plus de 2,5 %.

La figure 4-b présente l'évolution de la distribution des pores le long de la largeur de l'échantillon, c'est-à-dire dans le sens de la soudure. Sur la base de l'analyse de cette évolution, on peut conclure que le processus de soudage n'est localement pas complètement stabilisé. Ceci est probablement dû à un contact interfacial discontinu pendant la phase de soudage et au fait que la température de fusion de l'alliage AA7075 est plus élevée que celles des alliages AA6061 et AA2024. Il est à noter que cette évolution devrait conduire à une distribution hétérogène des contraintes lors d'un essai de traction. Par conséquent, la distribution des déformations devrait également être hétérogène sur toute la largeur de l'échantillon.

Sur la figure 4-d, on a représenté les distributions de pores dans la direction z. 60 % de la largeur de l'échantillon est affectée par les pores, avec une forte concentration à l'interface entre les alliages AA7075 et AA2024. Cette zone à forte concentration de pores est située à environ 4 mm en dessous de la surface de contact entre l'épaulement de l'axe et la tôle en alliage AA6061. Cela s'explique tout d'abord par le fait que la chaleur, générée principalement par la friction entre l'épaulement de la broche et la feuille d'alliage AA6061, n'est pas répartie de manière continue en raison de certaines discontinuités telles que les fines couches d'air, visibles sur la figure 3-a. Sur la figure 5, on a représenté, en niveau de gris sur 14 bits, une section dans le volume reconstruit par tomographie, pour le deuxième type d'échantillon (empilement AA7075,

AA2024 et AA6061). On s'est focalisé sur la distribution des alliages au voisinage du joint ainsi obtenu. On peut observer clairement, à nouveau, la présence de défauts mais également la manière dont la matière est mélangée. Les défauts sont apparus principalement à l'interface entre les alliages AA7075 et AA2024. Des bandes de matière provenant d'un mélange entre l'alliage AA2024 et AA7075 sont observées dans l'alliage AA6061.

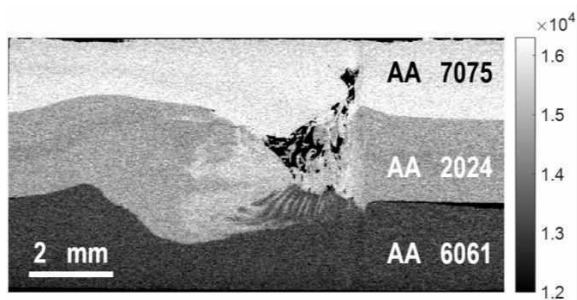


Fig. 5. Mise en évidence par tomographie des différents mécanismes de mélange.

Afin de mieux séparer l'interpénétration de ces alliages, il est nécessaire de développer des techniques d'analyse d'images tomographiques plus sophistiquées et capables de segmenter efficacement ces alliages dans les zones de mélange. Des travaux sont engagés dans ce sens au sein de l'équipe de recherche. Enfin, ces résultats issus de l'analyse tomographique permettront de construire des bases de données très précieuses pour la validation des modèles numériques.

Le champ de température est une des grandeurs essentielles pour la compréhension du procédé de soudage par friction malaxage. La distribution volumique de la température obtenue dans des conditions adiabatiques, en utilisant la modélisation de type SPH est présentée sur la Figure 6, pour un temps de simulation de 0,88s. Le gradient de température est clairement visible, avec les valeurs les plus importantes détectées au voisinage du pion. On constate également que ce gradient présente une variation significative dans la direction radiale au pion, ce qui est cohérent avec un calcul thermique de type adiabatique.

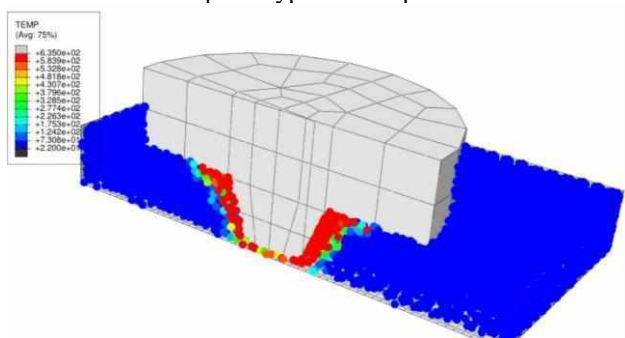


Fig. 6. Confrontation entre les comportements expérimental et numérique pour le modèle de Johnson Cook

Un autre résultat très utile et accessible uniquement avec cette méthode de simulation, aidant grandement à la compréhension de mécanismes de mélange, est représenté par le champ de déplacement des particules. Cette grandeur permettra de déterminer deux paramètres clés, indispensables à la caractérisation du degré de mélange et du volume disloqué. La figure 7 montre la distribution des particules à 3 instants différents de la simulation : $t=0s$ (état initial), $t=0,5s$ et $t=0,88s$ (le moment où le contact entre l'épaulement du pion et les particules est effectif). Pour mieux mettre en évidence comment les particules vont se mélanger pendant la phase de soudage, on les a représentées avec deux couleurs différentes : rouge pour les particules de la moitié supérieure et bleue pour les particules de la moitié inférieure.

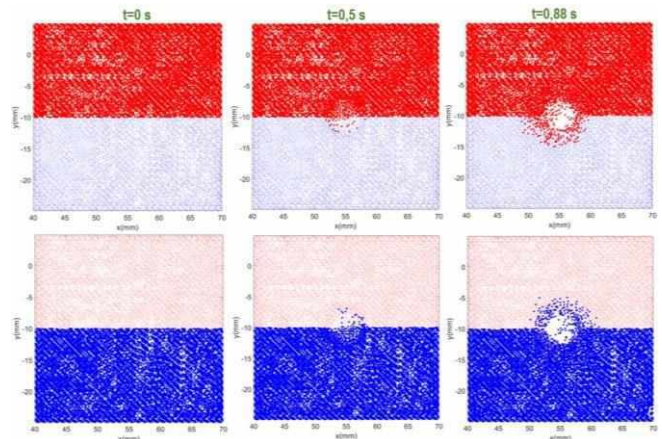


Fig. 7. Distribution de la matière obtenue avec une simulation de type SPH.

Les particules commencent à se mélanger progressivement, leur déplacement étant également influencé par l'évolution du champ de température. La trajectoire de chaque particule permettra de définir à un instant donné le degré de mélange ainsi obtenu. À partir de 0,5s, les particules pénètrent dans l'autre moitié à environ 3 mm par rapport à leur plan de délimitation, et leur interpénétration s'accélère quand l'épaulement de l'outil entre en contact avec la matière à souder. Un mélange sera considéré homogène quand une particule quelconque sera entourée d'un nombre identique de particules des deux couleurs, avec une distribution homogène. Il est bien évident que le mélange doit se faire non seulement dans le plan de l'échantillon, mais également dans la direction de pénétration du pion. Le volume mélangé est principalement imposé par la forme géométrique du pion avec une dimension caractéristique d'environ 2mm dans la direction normale aux surfaces actives du pion.

IV. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce papier, les auteurs proposent une stratégie basée sur des analyses expérimentales et numériques afin de caractériser la manière dont la matière est mélangée durant le procédé de soudage par friction malaxage. Cette stratégie s'appuie dans un premier temps sur des techniques d'investigation non destructives sans contact, de type tomographie aux rayons X, sur des joints obtenus en alliages d'aluminium. Le choix du couple d'alliages utilisés est influencé par le contraste de niveau de gris proposé lors de l'analyse tomographique. Parmi les 3 alliages testés, on constate que les alliages AA7075 et AA6061 proposent le plus fort contraste, s'expliquant par leur différence de masse volumique.

Ces premières investigations par tomographie aux rayons X ont montré une excellente adéquation avec les objectifs abordés, permettant ainsi la détection quantitative de la distribution spatiale de ces alliages dans le joint.

La segmentation de type classique, basée sur l'algorithme d'Otsu a permis de mettre en évidence non seulement le déplacement de la matière lors du soudage, mais également la présence de défauts et leur distribution dans le joint.

Un modèle de simulation, de type maillage libre, construit dans un cadre lagrangien et basé sur l'approche SPH a été mis en place et des résultats préliminaires montrent la capacité exceptionnelle d'un tel modèle à fournir des informations précieuses pour déterminer le degré de mélange et le volume mélangé du joint ainsi formé.

Les perspectives sont nombreuses, car avant tout il est nécessaire d'améliorer la stratégie d'analyse des images tomographiques, et cela pour pouvoir identifier de manière quantitative la distribution des alliages entre l'état initial et l'état final. Également, la stratégie de simulation doit être améliorée autant sur la résolution du problème

thermique en introduisant la conduction, mais également sur la possibilité de mélanger deux ou plusieurs matériaux avec des propriétés thermomécaniques différentes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Campus France et l'Institut français de Roumanie pour leur soutien financier (bourse du gouvernement français à Mme Eliza Roxana OPRESCU). La doctorante remercie également l'ENSTA Bretagne pour la formation et l'accompagnement lors des stages de recherche des études doctorales.

REFERENCES

- [1] France: CO2 Country Profile. <https://ourworldindata.org/co2/country/france>.
- [2] N. Leconte, B. Bourel, F. Lauro, C. Badulescu, E. Markiewicz, Strength and failure of an aluminum/PA66 self-piercing riveted assembly at low and moderate loading rates: experiments and modeling, *Int. J. Impact Eng.* 142 (2020)
- [3] G. Zhang, H. Zhao, X. Xu, G. Qiu, Y. Li, Z. Lin, Metallic bump assisted resistance spot welding (MBaRSW) of AA6061-T6 and bare DP590: part II-joining mechanism and joint property, *J. Manuf. Process.* 44 (2019) 19–27
- [4] W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Murch, P. Temple-Smith, C. J. Dawes, Friction Welding, United States Pat, 1991, p. 5,460,317
- [5] A. Boşneag, M.A. Constantin, E.L. Nitu, Numerical simulation of friction stir welding of three dissimilar aluminium alloys, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 564 (2019), 012033, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/564/1/012033>.
- [6] Buffiere, J.Y., Maire, E., Adrien, J. et al. In Situ Experiments with X ray Tomography: an Attractive Tool for Experimental Mechanics. *Exp Mech* 50, 289–305 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11340-010-9333-7>
- [7] M. Dhondt, I. Aubert, N. Saintier, J.M. Olive, Mechanical behavior of periodical microstructure induced by friction stir welding on Al–Cu–Li 2050 alloy, *Mater. Sci. Eng. A*, 644 (2015) 69–75, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.05.072>.
- [8] D. M. Iordache, E. R. Oprea, C. I. Malea, E. L. Nițu, M. O. Crăcănel et C. Bădulescu. "Determination of Johnson-Cook material constants for copper using traction tests and inverse identification". *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 1182, octobre 2021.