



### **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/10985/8445>

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

Nejah JEMAL, Serge TCHERNIAEFF, Jean-Eric MASSE, Franck GIROT, Laurent LANGLOIS -  
Caractérisation d'un alliage 2024-T3 assemblé par friction-malaxage - In: Conférence  
Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux, Algeria, 2010-11-27 -  
Conférence Internationale sur le Soudage, le CND et l'Industrie des Métaux - 2010

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

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



# CARACTERISATION D'UN ALLIAGE 2024-T3 ASSEMBLE PAR FRICTION-MALAXAGE

Nejah Jemal(1), Jean-Eric Masse(1), Laurent Langlois (2), Serge Tcherniaeff (3), Franck Giro(3).

(1) MECASURF, Arts et Métiers PARISTECH, Cours des Arts et Métiers, 13617 Aix-en-Provence, France

(2) LCFC, Arts et Métiers PARISTECH, Rue Augustin Fresnel, 57078 Metz Cedex 3, France

(3) LAMEFIP, Arts et Métiers PARISTECH, Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence cedex, France

E-mails: nejah.jemal@lamef.bordeaux.ensam.fr; jean-eric.masse@ensam.fr; laurent.langlois@metz.ensam.fr; serge.tcherniaeff@bordeaux.ensam.fr; franck.giro@bordeaux.ensam.fr

## Résumé

Le procédé FSW ou *Friction Stir Welding* qui peut se traduire en français par friction malaxage a été inventé par le TWI de Cambridge en 1991. La soudure est réalisée par apport de chaleur provoqué par le frottement d'un outil en rotation et mis en pression sur la pièce. L'outil comprend un épaulement qui vient en butée sur la surface de la pièce et un pion qui est enfoncé dans la pièce et qui détermine l'épaisseur soudée. Ce procédé a immédiatement intéressé les utilisateurs d'alliages légers car, sans passer par la fusion, il permet le soudage d'alliages à haute résistance, jusque là inutilisables en raison de leur soudabilité difficile avec les procédés traditionnels. Le FSW convient particulièrement bien aux alliages à bas point de fusion et peut trouver avec ces matériaux ses applications industrielles principales : aéronautique, spatial, transports terrestres, construction navale. Malgré son potentiel aujourd'hui démontré pour l'assemblage des alliages légers tels que les alliages d'aluminium ou de magnésium [1, 2, 3], un joint de soudure obtenu par friction malaxage peut contenir plusieurs types de défauts [4]. Dans cet article nous présentons les différents défauts que l'on peut rencontrer au sein d'un cordon FSW réalisé sur un alliage d'aluminium-magnésium-cuivre à vocation aéronautique, et nous expliquons leurs origines.

Pour améliorer la qualité de soudage et diminuer, voire éliminer, ces défauts, on réalise ensuite une étude paramétrique visant à l'optimisation des paramètres du procédé.

D'un point de vue microstructural, un joint de soudure FSW peut être décomposé en différentes parties : le noyau, la zone affectée thermomécaniquement, la zone affectée thermiquement et enfin le matériau de base. Les caractéristiques de ces zones sont explicitées et nous montrons leur dépendance avec les paramètres opératoires du procédé.

Mots clés : soudage par friction malaxage, caractérisation du cordon, paramètres opératoires.

## 1. Introduction

Avec la découverte du soudage par friction malaxage, on a pu remédier aux problèmes de fissurations rencontrés sur certains alliages avec les moyens de soudage traditionnels. La figure 1 montre le principe du procédé. La rotation de l'outil non consommable, combinée à la vitesse d'avance, permet de malaxer localement la matière entre les pièces à souder. Le soudage se fait à une température inférieure au point de fusion. Cette température est atteinte à la fois par le frottement outil/matière et les grandes déformations de la matière autour de l'outil.

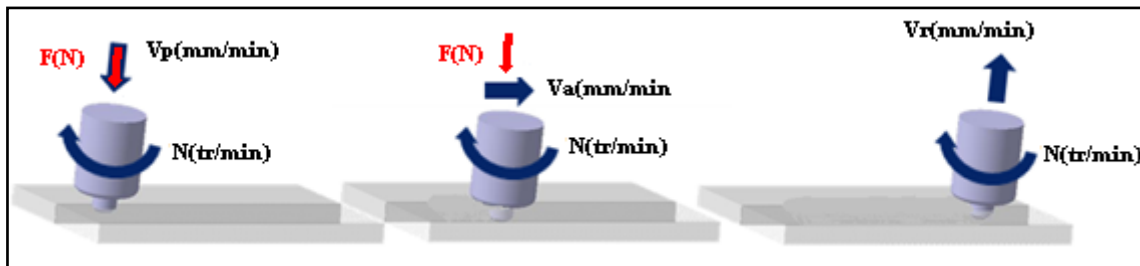


Figure 1. Principe du soudage par friction malaxage.

Dans un cadre d'une industrialisation du soudage par friction malaxage, on propose dans ce travail d'étudier l'influence des paramètres opératoires du soudage par friction malaxage sur les caractéristiques du cordon de soudure.

Les joints soudés en FSW sont généralement de haute qualité métallurgique et quasiment sans défaut. L'évolution temporelle de la température, ainsi que les déformations plastiques du matériau au cours de l'opération de soudage par friction malaxage provoquent des transformations métallurgiques dans la structure du joint soudé. La macrographie d'un joint de soudure obtenue par friction malaxage comporte quatre zones principales présentant des microstructures et des propriétés différentes [1, 2]. Les microstructures des soudures dans diverses zones sont analysées pour qualifier le joint de soudure obtenu par friction malaxage.

Notre travail est basé sur une étude paramétrique permettant de comparer principalement les cordons soudés avec différents paramètres et de déduire l'influence de ces différents paramètres sur la qualité du joint. Les soudures sont réalisées avec des plaques d'aluminium de nuance 2024-T3, selon un protocole expérimental précis permettant d'assurer la répétitivité des essais dans les mêmes conditions environnementales.






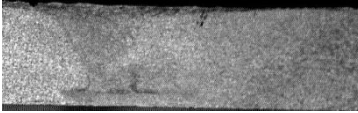
## 2. Les défauts dans un cordon FSW

Un cordon de soudure FSW peut comprendre un ou plusieurs types de défauts. L'origine de ces défauts n'est pas encore parfaitement connue. Les défauts peuvent être causés par un mauvais choix d'un ou plusieurs paramètres.

La connaissance industrielle et l'expérience peuvent aider à limiter ces défauts et non encore à les éliminer.

Ces défauts dépendent dans plusieurs cas de figure des différentes variables opératoires, d'où la nécessité de passer par un plan d'expérience pour choisir les paramètres opératoires les plus efficaces répondant à une qualité satisfaisante d'un point de vue industriel. Le tableau suivant présente les défauts rencontrés lors du soudage par friction malaxage.

**Tableau 1. Types de défauts présents au niveau d'un joint FSW .**

Type de défaut	Brulure (surface)	Ecaillage (surface)	Bavure (surface)
Matériau 2024-T3			
Type de défaut	Tunnel apparent à la surface	Tunnel au cœur du cordon	Manque de pénétration
Matériau 2024-T3		 Coupe transversale	 Coupe transversale

### 3. Tentative d'éliminations des défauts

Les brulures sont le résultat d'un grand apport de chaleur donc un rapport  $r = \text{vitesse de rotation} / \text{vitesse de soudage}$  trop élevé. Pour maîtriser ce défaut et l'éviter il faut diminuer ce rapport.

Le manque de pénétration comme l'indique son nom est dû au fait que le pion n'atteint pas le fond de la tôle. Ce défaut est dû à un mauvais choix de la géométrie de l'outil, mal approprié à l'épaisseur de la tôle.

Dans la suite, nous présentons une méthode palier le problème de mauvaise pénétration (voir paragraphe 3.1)

Il existe plusieurs remèdes pour éviter le défaut de type tunnel : modifier la géométrie de l'outil (ajout de rainure, filetage...) [5], augmenter l'effort de soudage [6] ou bien encore modifier l'inclinaison de l'outil

Pour éliminer le film d'oxyde il est conseillé d'appliquer un décapage mécanique ou chimique sur la surface supérieure de la tôle juste avant le soudage. Un film d'oxyde de très faible épaisseur, peut disparaître vu sa fragilité, lors du passage de l'outil.

Les bavures ou « flash » sont dus à un apport de chaleur intense lié à un important effort de soudage ou parfois à une pénétration importante.

Les défauts peuvent aussi survenir par un mauvais choix de l'épaulement qui ne permet pas de renfermer la matière autour du pion (un épaulement conique peut éliminer ce défaut). Les stries à la surface sont traitées dans le paragraphe suivant, elles sont généralement liées à la rigidité de l'outil et de la machine. Dans la plupart des cas elles ne sont pas traitées comme défaut mais comme un résultat lié nécessairement au procédé.

Dans le paragraphe suivant nous présentons une méthode de calcul pour estimer le choix de l'angle d'inclinaison.

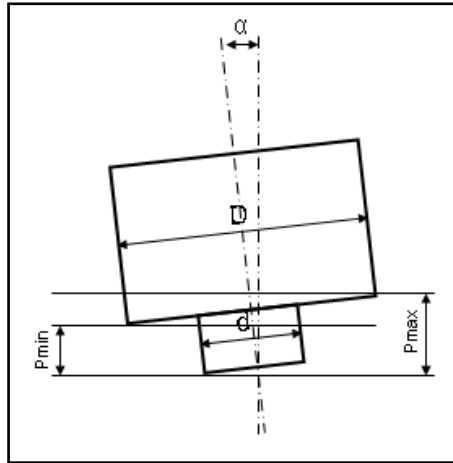


Figure 2. Positionnement de l'outil.

Condition d'utilisation d'un outil avec un angle fixe :  $P_{min} \leq P \leq P_{max}$

$$P_{min} = l_p \cos \alpha - \frac{D-d}{2} \sin \alpha$$

$$P_{max} = l_p \cos \alpha + \frac{D+d}{2} \sin \alpha$$

Avec  $l_p$  : longueur du pion,  $D$  : diamètre de l'épaulement,  $d$  : diamètre du pion et  $\alpha$  : angle d'inclinaison.

Pour obtenir une estimation sur l'angle maximal à ne pas dépasser et assurer la condition de contact entre l'épaulement et l'outil, on peut calculer l'angle maximal en fonction du diamètre de l'épaulement, de la longueur et du diamètre du pion, avec la condition suivante :

$$l_p \cos \alpha + \frac{D+d}{2} \sin \alpha \geq e$$

$$l_p \cos \alpha_{max} + \frac{D+d}{2} \sin \alpha_{max} = e$$

Pour résoudre cette équation on effectue le changement suivant :

$$t = \tan \frac{\alpha}{2}$$

$$\cos \alpha = \frac{1-t^2}{1+t^2}$$

$$\sin \alpha = \frac{2t}{1+t^2}$$

L'équation devient :

$$l_p \left( \frac{1-t^2}{1+t^2} \right) + \frac{D+d}{2} \left( \frac{2t}{1+t^2} \right) = e$$

Après simplification, on obtient l'équation du second degré suivante :

$$-(l_p + e)t^2 + (D+d)t - l_p - e = 0$$

$$\alpha_{\max} = \text{Sup} \left| 2 * \tan^{-1} t \right|$$

Dans notre cas, avec  $D=15$  mm,  $d=5$  mm,  $l_p=2.75$  mm et  $e=3$  mm, l'angle maximal est égal à  $2.58^\circ$ .

D'autres critères sont à prendre en compte lors du choix du point de fonctionnement tel que la durée de vie de l'outil. Ce dernier doit présenter une grande résistance à la flexion, compte tenu des vibrations générées par les efforts de soudage. Une valeur critique de vibration peut causer l'endommagement de l'outil et sa rupture. L'usure de l'outil s'accélère avec l'augmentation de la vitesse d'avance et la vitesse de rotation, à cause des hautes températures atteintes.

La vibration de l'outil est due à l'interaction outil/matière, elle peut être analysée dans les courbes des efforts et du couple.

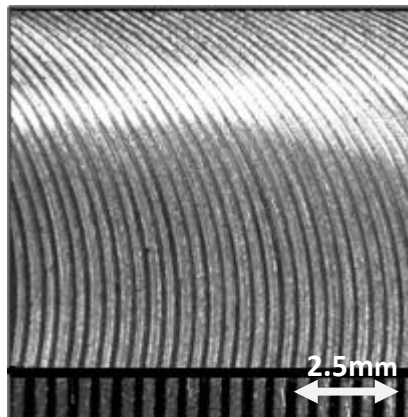


Figure 3. Stries de la face supérieure d'un joint FSW ( $V_a=120$ mm/min,  $N=350$ tr/min).

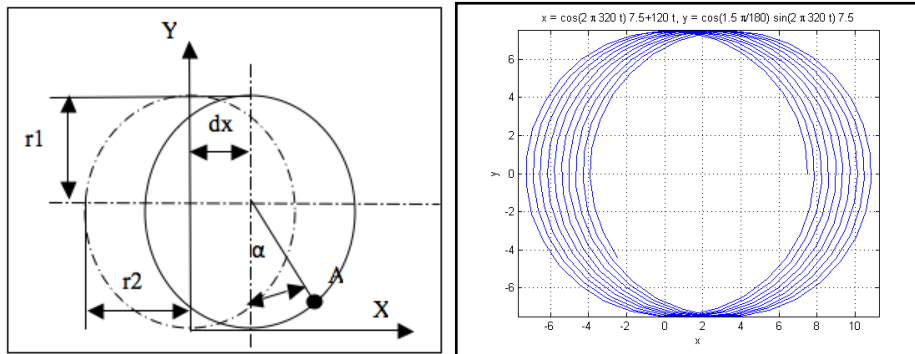
L'avance par tour ( $V_a/N$ ) est la distance parcourue par l'axe de l'outil pendant une rotation complète. Pour différent rapport ( $V_a/N$ ), on vérifie que le pas est égal à l'avance par tour. Le pas est la distance entre deux creux ou deux pics du profil de la face supérieure du cordon. Pour une longueur de 7.6mm on a 23 stries, une strie correspond bien au rapport  $V_a/N$ . Cette distance est mesurée entre deux pics du profil (figure 6).

Le profil des stries est déterminé par la trajectoire du plus bas point de l'épaulement. Si on considère la trajectoire d'un point A situé sur l'arrêt de l'épaulement qui occupe le plus bas point dans la matière, la projection de l'épaulement sur le plan de la plaque est une ellipse d'excentricité  $ex = \cos \alpha$  Donc on a  $ex = \cos \alpha = \frac{r1}{r2}$

Soit  $r1 = R$  donc  $r2 = R \cos \alpha$

L'équation paramétrique du mouvement d'un point situé sur l'outil exprimé dans le plan (x,y) est définie comme suit :

$$x = R \cdot \sin(\omega t) + V_a \cdot t \quad y = R \cdot \cos\alpha \cdot \sin(\omega t)$$



Figures 4 et 5. Trajectoire du point le plus bas et profil des stries sur la face supérieur du joint FSW

La morphologie laissée par l'outil au niveau de la face supérieure est facteur de plusieurs paramètres,

Cette morphologie est à prendre en compte lors du soudage en FSW et plus en amont lors de la conception de l'outil [7]. Cette morphologie est caractérisée par des stries.

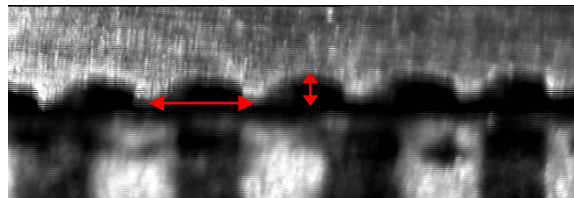


Figure 6. Identification du pas et creux du profil de la face supérieure (Va=120, N=350).

L'analyse des stries permet de comprendre leurs formations. Nous avons observé que la périodicité des stries correspond à l'avance par tour de l'outil. Comme il a été déjà dit, ces stries sont la trace du plus bas point de l'épaulement. Même si l'angle tilt est nul on peut retrouver ces stries à cause des défauts de fabrication de l'outil et de l'interaction outil/matière.

#### 4. Etude paramétrique

Pour comprendre l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques mécaniques des assemblages, un domaine de soudabilité a été qualifié préliminairement. Ce domaine est conditionné par l'absence des pores macroscopiques. L'observation au microscope optique nous a permis d'identifier ce domaine. Les soudures sont réalisées sur des plaques laminées de caractéristiques mécaniques suivantes :

**Tableau 2. Propriétés mécaniques de l'alliage 2024-T3**

E(GPa)	Re(MPa)	Rm(MPa)	A%
73	299	450	18

#### 4.1. Domaine de soudabilité

Il existe plusieurs paramètres opératoires qui peuvent conditionner la qualité du joint FSW. Pour se limiter à trois paramètres opératoires nous avons décidé de prendre un angle d'inclinaison fixe égal à  $1.5^\circ$ . Celui-ci a été déterminé lors d'essais préliminaires.

En accord avec l'Institut de soudure, l'effort de forgeage défini pour une tôle de 3 mm en alliage 2024 a été choisi avec des valeurs encadrant 15kN. La machine utilisée est pilotée en effort ce qui nous a permis d'intégrer l'effort dans notre plan d'étude.

La pénétration du pion est choisie selon un calcul simple en fixant l'angle d'inclinaison puis adaptée si un manque de pénétration est constaté.

Il faut noter aussi que le triplet choisi est approprié à la géométrie de notre outil. Un changement de la géométrie de l'outil agit en effet directement sur le point de fonctionnement.

Dans notre cas le domaine de soudabilité est l'espace de travail choisi comportant des valeurs minimales et maximales pour les trois paramètres opératoires. Ce domaine est limité par un espace défini par des valeurs limites.

**Tableau 3. plan d'expérience**

N (tr/min)	Va (mm/min)	effort de forgeage (N)
350	120	15
350	100	15
350	150	15
300	120	15
400	120	15
350	120	14
350	120	16

Les essais de traction ont été effectués sur des éprouvettes normalisées à température ambiante. Ces éprouvettes sont découpées par jet d'eau perpendiculairement au joint de soudure. Le cordon se situe au milieu de l'éprouvette, donc dans la zone utile.

#### 4.2. Influence de la vitesse de rotation N(tr/min)

Pour étudier l'influence de la vitesse de rotation, nous avons fixé les valeurs de la vitesse d'avance et celle de l'effort appliqué. Dans ce cas, la vitesse de rotation prend trois valeurs. La figure suivante montre l'influence de ce paramètre sur les qualités mécaniques issues des essais de traction effectués sur cinq éprouvettes de traction.



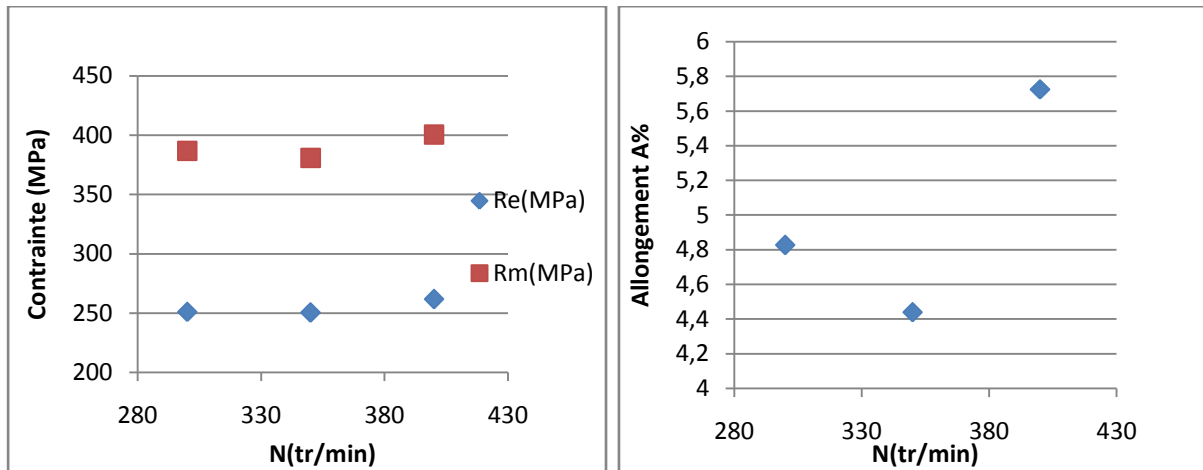


Figure 7. Influence de la vitesse de rotation sur Re, Rm et l'allongement A% à F=15Net Va=120mm/min

On peut constater globalement que la vitesse de rotation dans le domaine étudié a peu d'influence sur la limite élastique et la résistance à la rupture. La meilleure qualité mécanique est obtenue avec une vitesse de rotation égale à 400 tr/min.

#### 4.3. Influence de la vitesse d'avance Va(mm/min)

Ce paramètre important dans l'apport de l'énergie thermique conditionne le cycle thermique du joint FSW. La figure 8 présente le comportement mécanique avec la variation de ce paramètre.

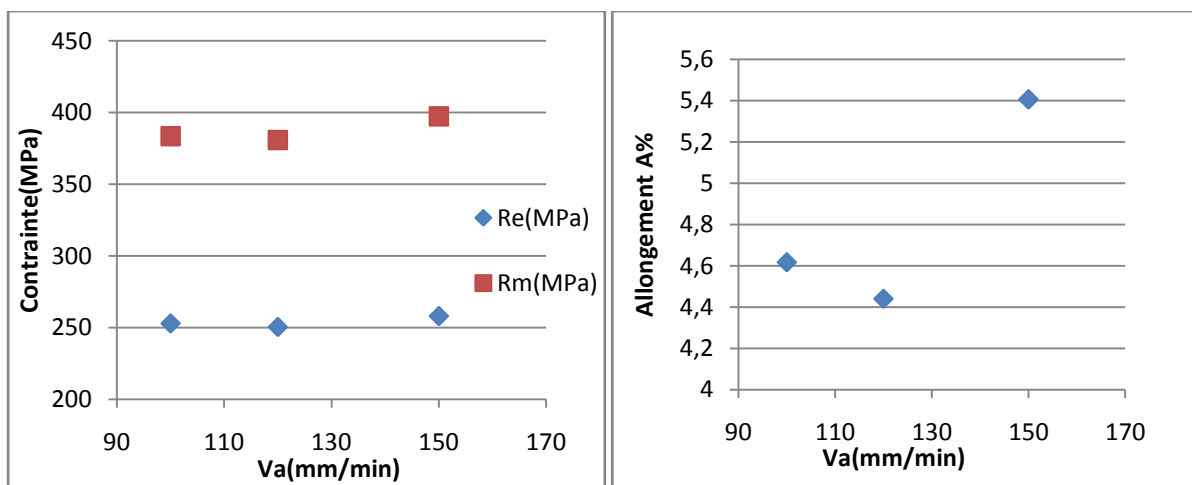


Figure 8. Influence de la vitesse de rotation sur Re, Rm et l'allongement A% à F=15Net Va=120mm/min

Une variation de 120 à 150mm/min a comme résultat une amélioration de l'allongement. Toutefois, le domaine d'étude restreint ne permet pas de quantifier et qualifier le couplage entre la vitesse d'avance et les autres caractéristiques mécaniques.

#### 4.4. Influence de l'effort de forgeage F(N)

L'effort de forgeage est un paramètre important en FSW. A mesure que la charge axiale augmente, la pression hydrostatique entre l'outil et la matière augmente, de ce fait la température de soudage augmente et favorise l'écoulement de la matière autour du pion.

Selon Kumar [6] il existe une charge axiale optimale qui donne des meilleures résistances à la traction.

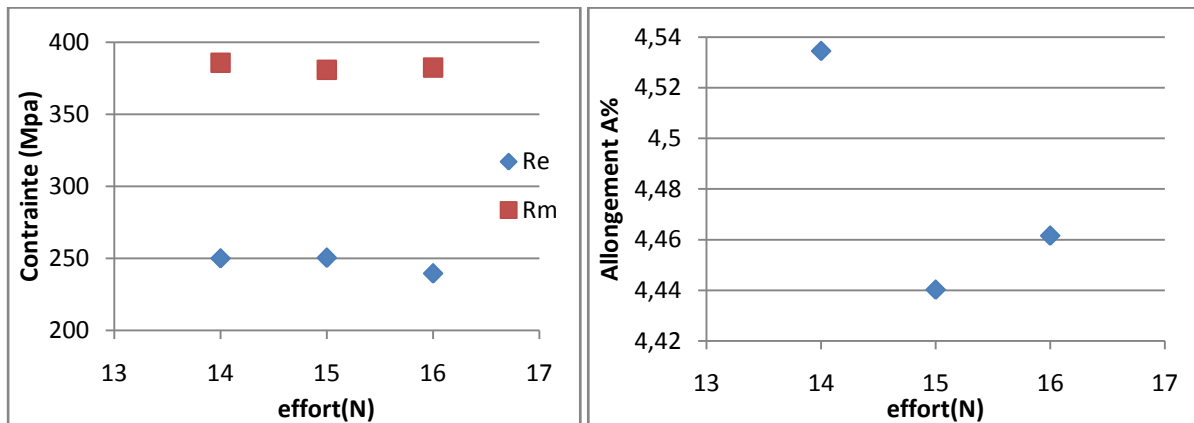


Figure 9. Evolution de Re, Rm et A% en fonction de l'effort de forgeage F.

La figure 9 montre les courbes qui relient l'effort de forgeage avec la limite d'élasticité et la résistance à la rupture. Nous remarquons que dans le domaine étudié, ce facteur n'influe que légèrement sur Re et Rm et l'allongement A%.

L'étude comparative des différents résultats des essais de traction a montré que le joint obtenu par les paramètres suivants  $N=400$  tr/min,  $V_a=120$  mm/min et  $F=15$ N présentait les meilleures caractéristiques en traction. Ces paramètres permettent d'obtenir un joint présentant limite d'élasticité égale à 260MPa, une résistance à la rupture de 400MPa et un allongement de 5.7%.

Cette étude nous a permis de déduire l'importance de la vitesse de rotation et celle de l'avance dans un cordon FSW exempt de macro-pores. L'effort de forgeage a peu d'influence sur les caractéristiques du cordon. Toutefois, ce paramètre reste très important pour l'élimination des macro-pores [6].

## 5. Les différentes zones du cordon et microstructure

Le cordon FSW peut être divisé en différentes parties, en se basant sur la microstructure du matériau après soudage.

L'Institut de soudure britannique TWI a standardisé ces zones. La forme et la microstructure de ces zones sont discutées dans plusieurs travaux de recherches [8].

La figure suivante montre une macrographie qui présente les différentes zones du cordon obtenu par friction malaxage.

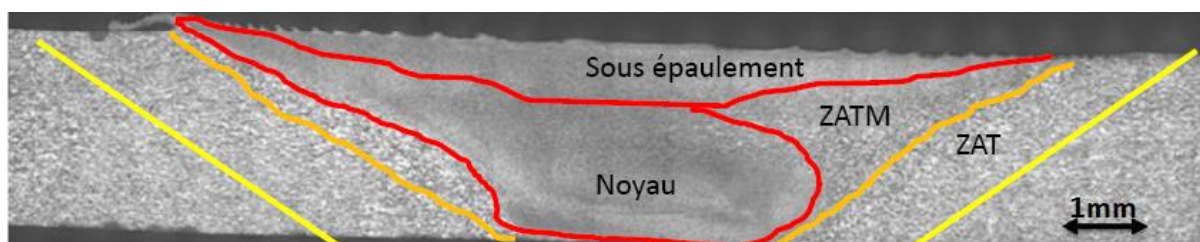


Figure 10. Les différentes zones du cordon

La soudure se compose principalement de quatre zones suivant la taille des grains et leurs aspects morphologiques. Le joint de soudure FSW n'est pas parfaitement symétrique d'un point de vue morphologique.

Le matériau soudé en FSW subit une transformation métallurgique importante, et présente ainsi différentes zones. Les zones malaxées subissent d'une part un important gradient de chaleur qui s'étend jusqu'aux deux cotés du joint, d'autre part de grandes déformations. La zone centrale du cordon est affectée par des grandes déformations dues à un mouvement chaotique derrière l'outil.

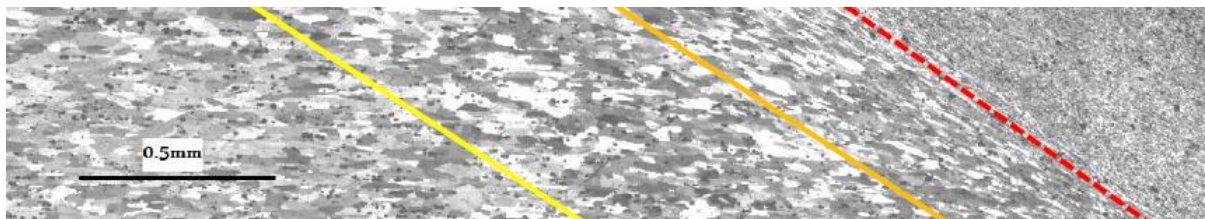


Figure 11. limites des zones

La première zone est la plus éloignée du cordon. On y trouve les caractéristiques du métal de base car elle n'a pas subi une élévation de température affectant ses propriétés microstructurales et mécaniques. Cette zone possède une frontière avec une zone dite affectée thermiquement. Définir cette frontière est souvent complexe. Elle est habituellement caractérisée grâce à un changement de taille de grain ou par la variation de dureté entre les deux zones.

La zone affectée thermiquement (ZAT ou HAZ) a subi une élévation de température. Elle est limitée vers le centre par la zone affectée thermomécaniquement. Le cycle thermique subi par la ZAT affecte la taille des grains : on assiste à un léger grossissement de la taille des grains dans cette zone. Le gradient de température obtenu lors de l'assemblage peut aussi affecter les caractéristiques de dureté. On assiste à une chute de dureté dans cette zone si l'alliage a été au préalable traité pour avoir une dureté optimisée.

La zone affectée thermomécaniquement (ZATM ou TMAZ) se trouve autour du noyau et est limitée par la frontière de la zone affectée thermiquement. Elle subit des grandes déformations qui provoquent un changement d'orientation des grains par rapport à la direction initiale du laminage.

On peut distinguer une différence d'orientation de grain dans cette zone en rapport avec l'écoulement de matière. Dans une coupe transversale la limite de cette zone du côté *advancing* avec la ZAT est nette, par contre cette zone est difficilement délimitée du côté *retreating*. Cette différence est due à un écoulement complexe autour du pion et au dessous de l'épaulement.

Le noyau se situe derrière la zone balayée par le pion, il a la forme d'une goutte et possède une structure concentrique au niveau de son centre appelée généralement *onion ring*. Le noyau subit une grande déformation et un gradient de température très élevé qui le ramène à un état semi solide visqueux. Dans cette zone, la matière est soumise à un intense gradient de déformation. Les grains du métal de base sont totalement broyés par l'outil et subissent une recristallisation dynamique [9]. Les observations microscopiques dans cette zone révèlent des grains fins et équiaxes. Les précipités intermétalliques grossiers existants dans le matériau de base sont aussi broyés lors du passage de l'outil et se présentent sous une taille plus fine. D'autres précipités existants peuvent se dissoudre et se présenter sous d'autres formes. L'aspect fin des grains dans le noyau assure une dureté presque équivalente au matériau de base.

Une autre zone de microstructure équivalente au noyau, appelée *flow arm*, est située au-dessous de l'épaulement et au dessus du noyau. Elle est sujette à une grande déformation et un important gradient de température. Le couple appliqué sur cette zone engendre des grandes déformations : l'épaulement vient forger la matière par l'effort appliqué suivant l'axe Z. L'adhérence entre l'épaulement et la matière, générée par l'effort et le couple au niveau de l'axe Z, permet de pétrir la matière au dessous de l'épaulement.

Cette zone peut être caractérisée par sa longueur légèrement supérieure au diamètre de l'épaulement et une profondeur relié à l'effort de forgeage et au couple appliqué.

Pour un joint soudé avec une vitesse de rotation égale à 350tr/min, une vitesse d'avance égale à 120mm/min et un effort de 15KN, la longueur est égale à 15mm et la profondeur proche de 1.2mm.

## Conclusion :

Le travail expérimental présenté a permis d'identifier les différents défauts qui peuvent exister dans un cordon FSW. La recherche d'un domaine de soudabilité nous a été utile pour proposer des solutions permettant d'atténuer les défauts au sein du cordon FSW. Cependant un certain nombre d'entre eux tel que les stries à la surface du cordon demeurent problématiques. L'étude expérimentale préliminaire s'avère nécessaire pour définir le domaine de soudabilité opératoire. Il faut bien noter que chaque modification dans les paramètres environnementaux peut affecter la qualité du joint de soudure.

Les résultats de l'étude paramétrique - bien qu'il nous aient permis d'identifier l'influence de certains paramètres opératoires dans un domaine de soudabilité défini - ont montré la difficulté d'identifier l'impact de chaque paramètre sur les caractéristiques mécaniques des cordons. Cette difficulté peut s'expliquer par le couplage des phénomènes physiques issus de ces paramètres opératoires.

Les observations microscopiques du cordon ont permis d'identifier les différentes zones du joint de soudure FSW. Elles ont abouti à la mise en évidence des frontières entre ces différentes zones par le biais du changement de la microstructure et de l'orientation des grains. A l'issue des essais de traction uniaxiale, les joints soudés par friction malaxage ont montré des qualités mécaniques acceptables.

## Nomenclature

N	[tr/min]	Vitesse de rotation de l'outil
Va	[mm/min]	Vitesse d'avance de l'outil
Vp	[mm/min]	Vitesse de pénétration
Vr	[mm/min]	Vitesse de retrait
F	[N]	Effort de forgeage
$\alpha$	[°]	Angle d'inclinaison
d	[mm]	Diamètre du pion
D	[mm]	Diamètre de l'épaulement
lp	[mm]	Longueur du pion
Re	[MPa]	Limite élastique
Rm	[MPa]	Résistance à la traction

**Références :**

- [1] Nandan R., T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia: Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties, *Progress in Materials Science*, 53 (6) pp. 980-1023, 2008
- [2] Squillace A., T. Segreto, U. Prisco, R. Teti, G. Campanile: Optimization of friction stir welds of aluminum alloys, *Intelligent Production Machines and Systems*, 247-252, 2006
- [3] Commin, L., J.E. Masse, M. Dumont, L. Barrallier: Friction stir welding of AZ31 Magnesium alloy rolled sheets - Influence of processing parameters. *Acta Materialia*, 57 (2) pp. 326-334, 2009
- [4] Kim Y.G., H. Fujii, T. Tsumura, T. Komazaki, K. Nakata: Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy, *Materials Science and Engineering A*, 415 (1-2) pp. 250-254, 2006
- [5] K. Elangovan, V. Balasubramanian: Influences of pin profile and rotational speed of the tool on the formation of friction stir processing zone in AA2219 aluminum alloy *Materials Science and Engineering A*, 459, pp. 7-18, 2007
- [6] K. Kumar, S. V. Kailas: On the role of axial load and the effect of interface position on the tensile strength of a friction stir welded aluminum alloy, *Materials and Design*, 29 (4) pp. 791-797, 2007
- [7] A. Scialpi, L.A.C. De Filippis, P. Cavaliere: Influence of shoulder geometry on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6082 aluminum alloy. *Materials and Design*, 28, pp. 1124–1129, 2007
- [8] <http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/>
- [9] C. Genevois. Genèse des microstructures lors du soudage par friction malaxage d'alliages d'aluminium de la série 2000 et 5000 et comportement mécanique résultant. PhD thesis, INPG, 2004.