



### **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/10985/8421>

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

Sedik OUALLAM, Lamine DJEGHLAL, L KABBA, Jean-Eric MASSE, Laurent BARRALLIER - Etude du soudage TIG de l'alliage d'aluminium 2024-T3 - In: Congrès français de mécanique (21; 2013; Bordeaux (Gironde)), France, 2013-08-26 - 21ème Congrès Français de Mécanique - 2013

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository

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



# Etude du soudage TIG de l'alliage d'aluminium 2024-T3

S. Ouallam<sup>a,b,c</sup>, J.-E. Masse<sup>b</sup>, M.L. Djeghlal<sup>c</sup>, L. Barrallier<sup>b</sup>, L. Kabba<sup>a</sup>

a. Centre National de Recherche en Soudage et Contrôle, Route de Dély-Brahim, Chéraga – Alger, Algérie

b. Laboratoire MSMP, Arts et Métiers ParisTech, Cours des Arts et Métiers, Aix-en-Provence, France

c. Ecole Nationale Polytechnique, Avenue Hacén Badi, El Harrach – Alger, Algérie

## Résumé :

*Les programmes récents de conception d'aéronefs sont caractérisés, sur le plan des matériaux, par l'introduction d'alliages soudables, qui, en se substituant à la technique traditionnelle de rivetage, ouvrent la voie à un gain de masse, à des réductions de coût en production et en maintenance, essentiellement grâce à une amélioration de la résistance à la corrosion et à la fatigue.*

*La compréhension de l'influence des différents paramètres du procédé de soudage TIG (Tungsten Inert Gas) appliqué à l'alliage d'aluminium 2024-T3 doit nous aider pour la prise en compte, dès la conception des structures, de comportement en service des assemblages. Le travail présenté porte sur la définition d'un domaine opératoire de soudabilité de l'alliage étudié et les conséquences métallurgique et mécanique de cet assemblage sur les propriétés du matériau.*

*Concernant l'aspect opératoire, un programme d'essais, couplé à des mesures du champ thermique par thermographie infrarouge, nous a permis de comprendre l'influence des différents paramètres intervenant lors de l'opération de soudage (tension, intensité, vitesse de soudage, protection gazeuse, métal d'apport).*

*D'un point de vue caractérisation, l'observation classique en microscopies optique et électronique couplée à la diffraction d'électrons rétrodiffusés nous a permis d'accéder à des informations sur la microstructure de la zone d'assemblage, nous permettant une meilleure compréhension du comportement mécanique du joint de soudure, caractérisé par des essais de microdureté et de traction.*

## Abstract:

*Recent programs of aircraft design are characterized by the introduction of weldable alloys, which seems to have a promising future. By replacing the traditional assembly by riveting, welding can allow mass gain, cost savings in production and maintenance, mainly due to an improvement in corrosion resistance and fatigue. The aim of this work is the definition of a field operative weldability of the alloy studied and metallurgical and mechanical consequences of this assembly on the material properties. Regarding operational aspect, a test program, coupled with field measurements by thermal infrared thermography has enabled us to understand the influence of different parameters involved in the welding operation (voltage, current, welding speed, shielding gas, filler metal). Concerning characterization, scanning electron microscopy coupled with electron backscatter diffraction has allowed us to access information on the microstructure of the assembly area, allowing us better understanding of the mechanical behavior of the welded joint, characterized by microhardness and tensile tests.*

**Mots clés:** soudage TIG, alliage 2024, microstructure, propriétés mécaniques

## 1. Introduction

Le travail présenté porte sur l'application du procédé TIG (Tungsten Inert Gas) à l'alliage d'aluminium 2024 (Al-Cu-Mg). Le procédé TIG, qui met en jeu un arc électrique, est l'un des procédés les plus utilisés pour le soudage des matériaux métalliques [1-2] et ce principalement pour de faibles épaisseurs [3]. L'arc est créé entre une électrode de tungstène non fusible et la pièce à souder sous un flux gazeux, qui peut être constituée d'argon, d'hélium ou d'un mélange de ces deux gaz. Les inconvénients du TIG sont principalement sa faible pénétration (souvent limitée à 5 mm) et une faible productivité [4-5]. Le procédé, souvent utilisé de façon manuelle sur site (ce qui nécessite un réel savoir-faire de l'opérateur), peut être semi-automatisé ou complètement automatisé dans des installations robotisées sur chaîne de production. Pour le soudage de

l'aluminium, on utilise le courant alternatif et le courant pulsé. Les formes du bain de fusion et du cordon de soudure peuvent varier selon le type de courant.

Les sources modernes d'énergie de soudage permettent de générer des courants alternatifs à ondes carrées et pulsées (en raison de la forme carrée de l'onde, nous pouvons favoriser les effets produits par chaque alternance) et sont généralement dotées d'un générateur de hautes fréquences qui génère des courants de faibles intensités superposés au courant du soudage, ce qui permet de stabiliser l'arc au changement de polarité dans le cas du courant alternatif. Chaque demi cycle du courant alternatif permet d'obtenir un nettoyage de la couche d'oxyde présente sur l'aluminium et d'augmenter la pénétration.

Dans le processus à arc pulsé, au cours des impulsions émises en présence d'un courant fort, une grande quantité de chaleur est produite dans la zone de soudage. Ceci génère la fusion du matériau à souder.

Quand l'émission d'impulsion s'arrête et que le courant redevient faible, une très petite quantité de chaleur est transmise à la pièce à souder, juste nécessaire pour entretenir le bain de fusion. Lorsque l'on soude avec un matériau d'apport, celui-ci fond en même temps que la matière de base pendant la phase d'impulsion. Une fréquence d'impulsion normale se situe entre 0,5 Hz et 10 Hz.

Grâce au soudage TIG à arc pulsé, le domaine d'application du procédé peut être étendu à de faibles puissances, on peut alors traiter des épaisseurs de matériau plus fines et obtenir un meilleur aspect du joint [6].

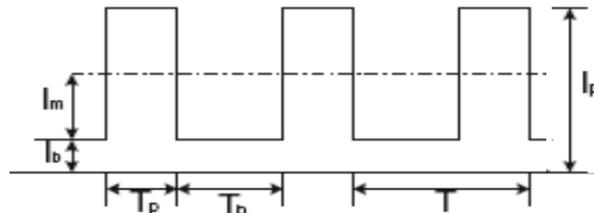


FIG.1 – Principe du courant pulsé sur le TIG

Le courant pulsé [7] est défini par :  $I_p$  (courant de pic en A),  $I_b$  (courant bas en A),  $T_p$  (temps de passage en courant haut en ms),  $T_b$  (temps de passage en courant bas en ms),  $T$  (période soit  $T_p + T_b$ ) et la fréquence de pulsation (en Hz). L'énergie mise en jeu en courant pulsé est définie par :

$$E = \eta (U \cdot I_m) / V \text{ avec } I_m = [(I_p \cdot T_p) + (I_b \cdot T_b)] / (T_p + T_b)$$

$I_m$  est l'intensité moyenne de soudage (en A).  $U$  est la tension de soudage (en Volts).  $V$  représente la vitesse de soudage (en mm/s) et  $\eta$  est le rendement de l'arc.

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'influence de la fréquence de pulse sur le comportement de l'arc et du bain de fusion obtenus sur un alliage d'aluminium de la série 2000.

## 2. Matériaux et techniques expérimentales

### 2.1 Matériau de l'étude

L'alliage d'aluminium utilisé est de nuance 2024 à l'état T3. La composition chimique moyenne (massique) de l'alliage est la suivante : 4.22% Cu ; 1.52% Mg ; 0.47% Mn ; Al (balance). Les propriétés en traction sont une résistance maximale de 483 MPa, une limite d'élasticité de 345MPa et un allongement de 18% [8].

### 2.2 Dispositif expérimental

Il est composé d'un poste de soudage de type Lincoln Square Wave TIG 355 avec possibilité de travail en courant continu, alternatif et pulsé, d'un système de bridage et d'un dispositif de protection envers assuré par du gaz argon de qualité industrielle. La commande du poste de soudage permet d'agir sur la fréquence, le courant bas - qui est un pourcentage du courant pré-réglé - et les temps de passage en courant bas et courant de pic. Le déplacement relatif de la torche par rapport à la pièce est effectué manuellement par un opérateur. Pour connaître le profil de température lors du soudage, nous utilisons une caméra thermique Flir Thermovision A40M pilotée par un PC.

Dans notre recherche d'optimisation des paramètres de soudage TIG, nous avons fixé certaines conditions opératoires à savoir :

- le type de gaz de protection (argon) et le diamètre de l'électrode de tungstène (1,6 à 2 mm) ;
- L'écart entre le courant de pic et le courant bas ;

– Les durées de passage en courants bas et de pic.

Ces paramètres sont appliqués pour toutes les expériences réalisées. Elles consistent à fixer un courant avant le soudage et à faire varier la fréquence. L'objectif est d'obtenir le meilleur couple paramètres/qualité esthétique de la soudure. Par « qualité esthétique » nous entendons l'absence de défauts rédhibitoires de types fissuration et criques, soufflures débouchantes et enfin imperfections de la soudure (irrégulière ou peu profonde). Les assemblages retenus seront ensuite étudiés d'un point de vue métallurgique et mécanique. Les soudages sont effectués sur des plaques d'épaisseurs 2 mm et sur des longueur et largeurs variables.

### 3. Résultats et interprétation

Les résultats de l'influence de la fréquence sur les variations de courant sont présentés sur la figure 2 pour une intensité initiale de 75A.

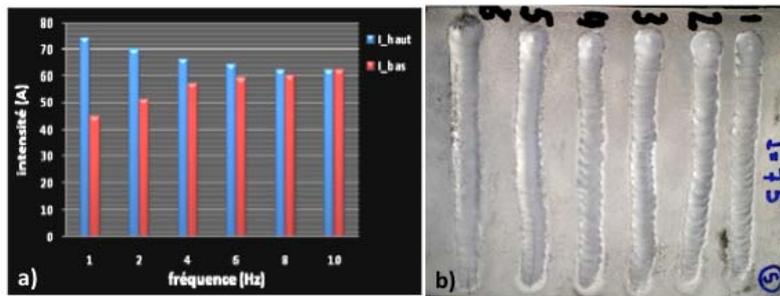


FIG. 2 – (a) Histogramme de variation des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence pour un courant initial de 75A (b) Aspect visuel des cordons de soudure.

L'histogramme montre que pour de faibles fréquences, l'écart entre le courant de pic et le courant bas est important. Ceci peut provoquer un gradient thermique important adéquat pour le soudage de faible épaisseur. Par contre pour des fréquences plus élevées, les courants bas et de pic se superposent avec des valeurs inférieures au courant pré-réglé. Le faible gradient thermique obtenu est favorable pour obtenir des conditions de soudage plus homogènes, avec un arc similaire à celui produit par un courant continu. On retrouve ces influences au niveau de l'aspect des cordons de soudures (figure 2b) où nous constatons, pour de faibles fréquences, un espacement des lignes de solidifications et un rapprochement de ces lignes dans le cas des fréquences plus élevées. Nous retrouvons ces résultats dans le cas d'un courant pré-réglé de 100 A (figure 3).

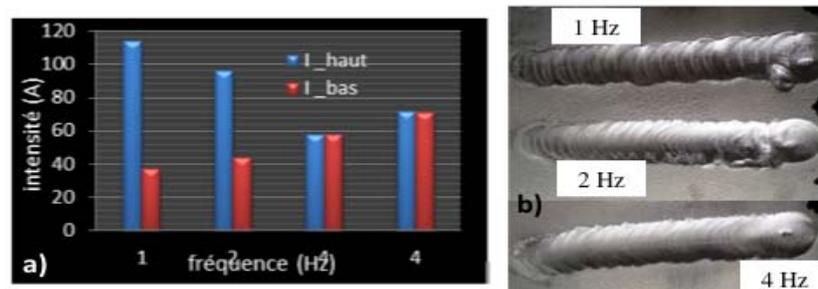


FIG. 3 – (a) Histogramme de variation des paramètres du courant pulsé en fonction de la fréquence pour un courant initial de 100A (b) Aspect visuel des cordons de soudure.

Les paramètres de soudage obtenus pour une intensité initiale de 100A, objet des soudures présentées sur la figure 3 sont donnés dans le tableau ci-dessous.

I <sub>0</sub> =100A											
f (Hz)	I <sub>p</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	T(s)	X(mm)	V(mm/s)	T <sub>p</sub> (ms)	T <sub>b</sub> (ms)	I <sub>m</sub> (A)	U(V)	η	E(J/mm)
1	114	37	18	60	3.3	0.5	0.5	75.5	18	0.7	285.4
2	96	44	20	57	2.9	0.5	0.5	70	16	0.7	275.1
4	58	58	22	60	2.7	0.5	0.5	58	18	0.7	268.0
4	72	71	18	60	3.3	2.4	0.5	71.5	16	0.7	240.2

Nous constatons que les énergies mises en jeu sont pratiquement égales avec un écart moyen de 13,5%. La différence très marquée quant à l'aspect des lignes de solidifications est expliquée par la combinaison de

l'effet de la fréquence combiné à la superposition des courants bas et de pic. Suite à cette étude paramétrique, nous avons choisi d'adopter une fréquence de 4Hz pour réaliser une soudure en bout à bout sur l'alliage 2024T3 avec un métal d'apport de type 5356 (5% mass. de magnésium), alliage d'aluminium le plus utilisé comme métal d'apport. Les paramètres utilisés pour les éprouvettes de caractérisation sont les suivants :

I <sub>0</sub> =100A											
f (Hz)	I <sub>p</sub> (A)	I <sub>b</sub> (A)	T(s)	X(mm)	V(mm/s)	T <sub>p</sub> (ms)	T <sub>b</sub> (ms)	I <sub>m</sub> (A)	U(V)	η	E (J/mm)
4	88	76	71	220	3.1	0.5	0.5	82	16	0.7	296.4

Une vue endroit et envers du cordon de soudure obtenu est présentée en figure 4.

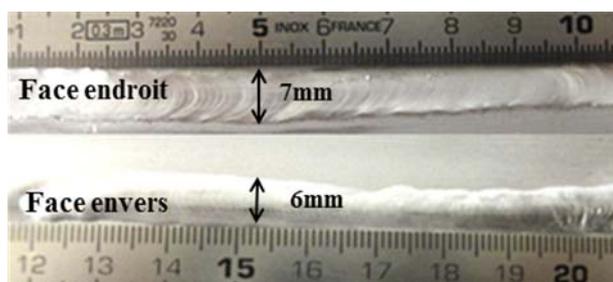


FIG.4 – Soudure 2024-T3 avec métal d'apport 5356 selon les paramètres opératoires optimisés.

### 3.1 Caractérisation microstructurale.

Les observations métallographiques sont effectuées à l'aide d'un microscope optique Olympus BX41M avec camera CCD et logiciel de prise d'images et de mesures. Les échantillons ont été attaqués au réactif de Keller. Les microstructures obtenues sont présentées sur la figure 5.

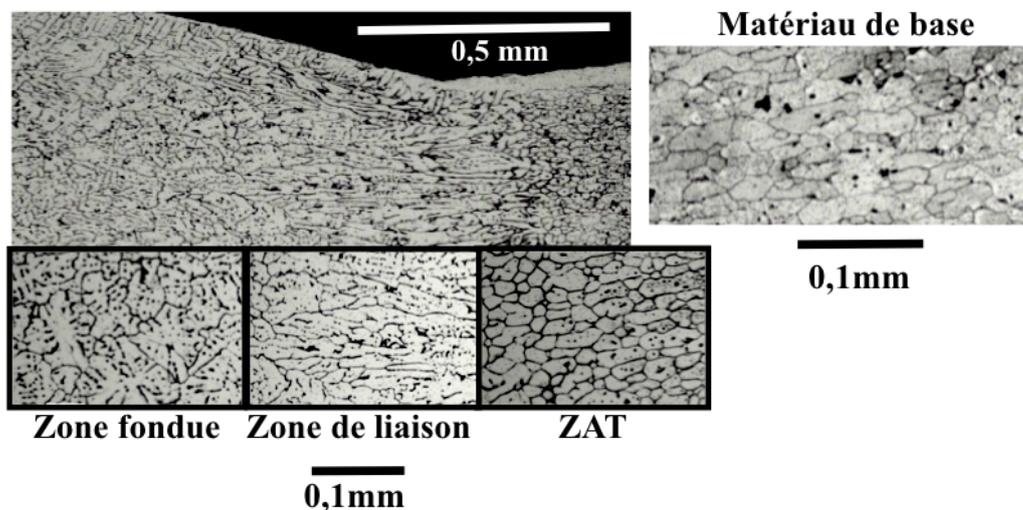


FIG. 5 – Structure des différentes zones de la soudure de l'alliage 2024T3

On peut distinguer quatre zones représentatives : tout d'abord le métal de base formé de grains allongés caractéristiques du laminage. Ensuite vient la zone affectée thermiquement (ZAT) puis une zone qualifiée de zone de liaison qui est constituée de grains dendritiques colonnaires. Cette zone de liaison est une interface entre la ZAT et la zone fondue dans laquelle on retrouve des grains dendritiques équiaxes.

Si le terme microstructure concerne la texture morphologique, c'est-à-dire la taille et la forme des grains, il comprend aussi la texture cristallographique – la distribution des orientations cristallographiques – paramètre essentiel pour optimiser les propriétés mécaniques des matériaux métalliques. Nous avons donc utilisé la technique de diffraction d'électrons (EBSD) afin de réaliser des cartographies des différentes zones de nos soudures.

Comme l'EBSD est une technique de surface sensible, avec un signal provenant des quelques premiers nanomètres de la couche superficielle du réseau cristallin, il est essentiel que cette couche soit exempte de dommage (écrouissage) et de toute contamination ou couches d'oxydation, ce qui rend la préparation de

l'échantillon extrêmement critique. Nous avons mis au point une procédure de polissage électrolytique à basse température qui permet d'obtenir des taux d'indexation supérieurs à 90%. Les analyses effectuées nous ont permis d'apprécier plus précisément la zone interface entre la zone fondue et la ZAT (figure 6).

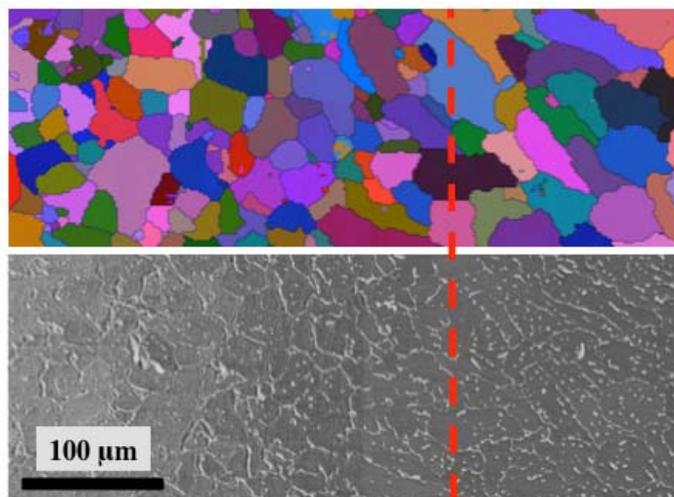


FIG. 6 – Zone interface entre zone fondue et ZAT. Carte EBSD (coloration All Euler) et image en électrons rétrodiffusés correspondante.

### 3.2 Propriétés mécaniques : évolution de la microdureté.

Des filiations de microdureté ont été réalisées sur nos cordons à l'aide d'un pénétrateur Vickers, sous une charge de 200 g et avec un pas de 0,3 mm entre chaque indentation. Cet essai nous a permis d'observer la variation de la microdureté pour chaque zone. La valeur dans le métal de base est proche de celle obtenue dans la zone affectée thermiquement mais très supérieure à celle dans le cordon de soudure. Les résultats sont présentés sur la figure 6 ci-dessous. On remarque une chute des valeurs dans la partie de la ZAT la plus proche du matériau de base qui pourrait être attribuée à un sur vieillissement de l'alliage dans cette zone [9].

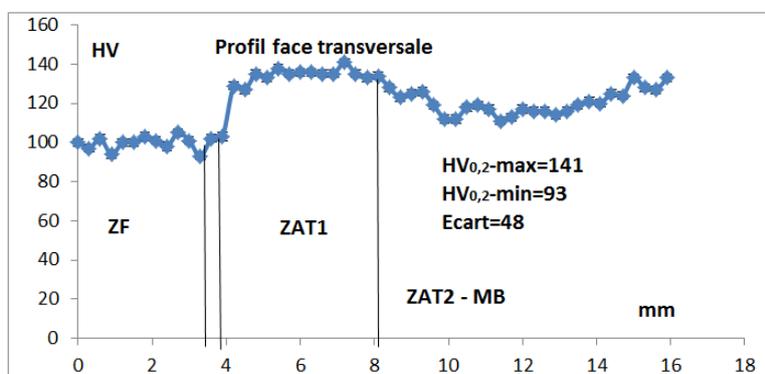


FIG. 7 – Filiation de microdureté sur un cordon de soudure (du centre de la soudure au métal de base).

### 3.3 Propriétés mécaniques : résistance à la traction

Les essais ont été effectués sur une machine de traction in-situ de charge maximale 5KN dotée d'un capteur de déplacement d'une course de 12mm. Ils sont effectués sur une éprouvette (longueur 53mm ; largeur 5mm) découpée par jet d'eau abrasif sur la face transversale d'un joint de soudure comprenant les différentes zones et une autre éprouvette extraite de la même façon dans du métal de base. La vitesse de sollicitation est de 5μm/s. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Condition	Limite d'élasticité (MPa)	Limite à rupture (MPa)	Allongement (%)
Matériau de base	308	466	20
Soudure TIG	-	310	3

La résistance à la rupture ainsi que l'allongement ont chuté de façon dramatique par rapport au matériau de base. La rupture sur l'éprouvette soudée s'est produite dans la zone de liaison. La fractographie (figure 7) met en évidence une rupture ductile pour le matériau de base et une rupture fragile pour le matériau soudé.

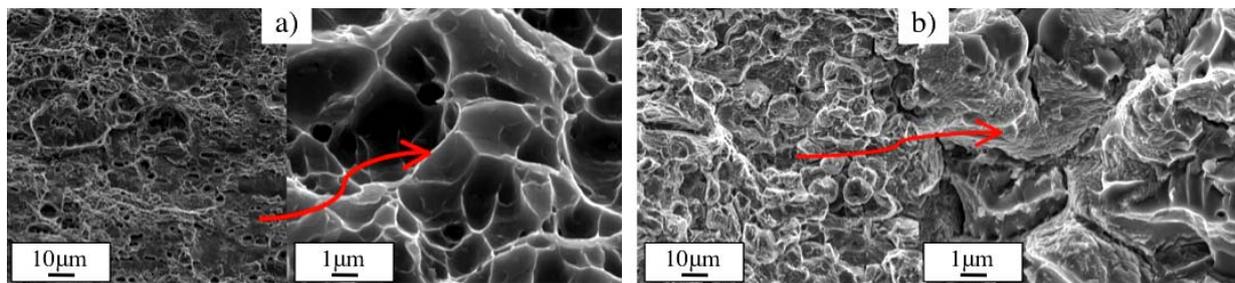


FIG.8 – Fractographie de l'éprouvette soudée (a) et du métal de base (b)

#### 4. Conclusions et perspectives.

Ce travail est une première approche concernant la détermination et la maîtrise des paramètres opératoires pertinents dans le cas du soudage par procédé TIG pulsé. Les paramètres déterminés ont été utilisés pour réaliser plusieurs cordons de soudure sur un alliage d'aluminium 2024 à l'état T3. Les soudures obtenues sont exemptes de fissuration et de porosité.

Pour des fréquences inférieures à 4Hz, l'écart entre les courants de pic et bas est important, ce qui engendre des gradients thermiques qui tendent à éloigner les stries de solidification.

Pour des fréquences supérieures à 4Hz, l'écart entre les deux courants se réduit pour atteindre une même valeur pour une fréquence de 10Hz. Les cordons de soudure obtenus sont plus compacts.

D'un point de vue caractérisation, le point le plus important à relever est la plus grande fragilité du matériau après assemblage. Cela est vérifié par les résultats des essais de traction et les observations des faciès de rupture. La compréhension de ce mécanisme de rupture passe par une exploitation complète des données issues des caractérisations par EBSD et une étude de l'état mécanique (contraintes résiduelles) du cordon de soudure.

#### Références

- [1] C. Vasconcelos Gonçalves et al., Application of optimization techniques and the enthalpy method to solve a 3D-inverse problem during a TIG welding process. *Applied Thermal Engineering*, 30 (2010) 2396–2402
- [2] A. Durgutlu, Experimental investigation of the effect of hydrogen in argon as a shielding gas on TIG welding of austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 25 (2004) 19–23
- [3] M.P. Nascimento and H.J.C. Voorwald, Considerations about the welding repair effects on the structural integrity of an airframe critical to the flight-safety. *Procedia Engineering* 2 (2010) 1895–1903.
- [4] T. Sakthivel et al., Comparison of creep rupture behavior of type 316L austenitic stainless steel joints welded by TIG and activated TIG welding processes. *Materials Science and Engineering A*, 528 (2011) 6971–6980
- [5] P.J. Modenesi et al., TIG welding with single-component fluxes. *Journal of Materials Processing Technology*, 99 (2000) 260–265
- [6] A. Kumar and S. Sunarajan, Optimization of pulsed TIG welding process parameters on mechanical properties of AA 5456 Aluminum alloy weldments. *Materials and Design* 30 (2009) 1288–1297
- [7] R. Manti et al., Pulse TIG welding of two Al-Mg-Si alloys. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17 (2008) 667–673
- [8] S. Abdullah et al., Fatigue crack growth simulation of aluminum alloy under cyclic sequence effects. In *Aluminum alloys: theory and applications*, InTech Pub. (2011) 247
- [9] R.A. Owen et al., Neutron and synchrotron measurements of residual strain in TIG welded aluminum alloy 2024. *Materials Science and Engineering A346* (2003) 159–167