

# THÈSE

Pour l'obtention du titre de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE

Sciences des Matériaux

Présentée par :

**Maxime El Kandaoui**

---

## **Contribution à la caractérisation microstructurale et mécanique du soudage laser de l'alliage Ti-6Al-4V pour la fabrication de rail de planchers aéronautique.**

---

Thèse soutenue publiquement le **14 décembre 2016 à 14h** Metz devant le jury composé de :

Salima Bouvier	Professeur, Université de Technologie de Compiègne	Examinatrice
Julitte Huez	Maitre de Conférence, Université de Toulouse	Examinatrice
Nadège Brun	Ingénieur de Recherche, Institut de Soudure	Examinatrice
Pierre Sallamand	Professeur, Université de Bourgogne	Rapporteur
Mohammad Jahazi	Professeur, Université du Québec, ETS	Rapporteur
Éric Fleury	Professeur, Université de Lorraine	Directeur de thèse
Lionel Germain	Maitre de Conférence HDR, Université de Lorraine	Co-directeur de thèse
Fabrice Scandella	Expert Senior matériaux et procédés, Institut de Soudure	Co-directeur de thèse

*Lieu de la soutenance :* **Université de Lorraine Ile du Saulcy Bâtiment de l'UFR-MIM  
Amphithéâtre Hermite 57000 Metz**

*Laboratoire LEM3, Ile du Saulcy, 57045 Metz  
Université de Lorraine – Pôle M4 : matière, matériaux, métallurgie, mécanique*

# Résumé

L'alliage de titane Ti-6Al-4V a été choisi comme matériau de substitution pour les rails de sièges dans les avions de lignes récents du fait de sa compatibilité avec les composites renforcés par fibre de carbone. Les rails en Ti-6Al-4V sont actuellement fabriqués à partir d'un profilé extrudé dont la géométrie, optimisée pour l'extrusion, conduit à une perte de matière de 84 % lors de l'usinage. Une alternative envisagée dans le cadre du projet FUI « plancher du futur » est la substitution de ce brut extrudé par un brut soudé par faisceau laser au plus près des cotes finales du rail.

Dans ce contexte, ce travail de thèse a eu pour objectif final de proposer une procédure d'assemblage conduisant à la géométrie du brut. Les paramètres de soudage ont été optimisés pour garantir à la fois la robustesse du procédé de soudage et des propriétés mécaniques au moins équivalentes à celles du brut extrudé.

Dans un premier temps, une étape de conception du rail couplée à une analyse de la valeur a permis de proposer un brut soudé répondant aux spécifications de l'industrie aéronautique en minimisant à la fois les coûts associés au soudage et à l'usinage. Le brut soudé ainsi obtenu est constitué d'un assemblage simple de plaques d'épaisseur 5 mm et de tôles d'épaisseur 3 mm de deux grades de Ti-6Al-4V.

Dans un second temps, une étude de l'influence des paramètres de soudage (puissance, vitesse, distance focale, ...) sur la géométrie des cordons de soudure et les structures de solidification finale a été réalisée. Les essais ont été menés sur des assemblages bout à bout de tôles et de plaques avec un laser à fibre de 10 kW. L'analyse statistique des défauts de soudage prenant en compte les principaux paramètres de soudage, a permis d'obtenir un jeu de paramètres optimisés pour chacune des épaisseurs soudées.

La caractérisation des microstructures et des textures cristallographiques des matériaux de base et des cordons de soudure a permis de caractériser finement les transformations induites par le soudage laser. Il a été ainsi montré que la zone affectée thermiquement se divise en 4 zones où des mécanismes d'évolution des microstructures et des textures distincts opèrent. La taille de chaque zone a pu être mesurée précisément.

Des essais de traction réalisés sur le métal de base et les tôles soudées avant et après traitement thermique de détensionnement ont été utilisés afin de caractériser le comportement mécanique des assemblages. Dans le but de distinguer le comportement des zones fondue (ZF) et affectée thermiquement (ZAT) de celui du métal de base, la déformation locale a été mesurée par une technique de corrélation d'images. Ces mesures ont clairement mis en évidence que les déformations mesurées dans la ZF et la ZAT sont bien inférieures à celles des matériaux de base, et que la rupture se produit dans le matériau le plus faible loin du cordon de soudure. La déformation limitée dans la ZF et la ZAT permet d'expliquer la réduction partielle de la ductilité mesurée sur les assemblages soudés. Le détensionnement thermique post-soudage améliore sensiblement la ductilité et conduit à une légère augmentation de la limite d'élasticité et de la résistance mécanique des éprouvettes soudées.

Les résultats de cette étude, réalisée dans une large gamme de paramètres de procédé et complétés par les données de la littérature, ont permis de déduire des relations entre procédé, microstructure et propriété des assemblages soudés. Il ressort que la puissance de soudage a une forte influence et qu'une augmentation de la vitesse de soudage, en raison de la faible valeur de l'apport de chaleur spécifique transmise, est favorable à une réduction de la largeur du cordon de soudure et de la taille des défauts tels que la profondeur des caniveaux. Ces résultats ont été complétés par une analyse statistique multi-variée avec la méthode de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de prendre en compte un plus grand nombre de facteurs influençant la qualité du soudage par faisceau laser.

# Abstract

The Ti-6Al-4V titanium alloy was chosen as a substitute material for the seat rails in the recent aircraft lines because of its compatibility with carbon fiber reinforced composites. Ti-6Al-4V rails are currently manufactured from extruded profile whose geometry is optimized for extrusion however leading to a 84% material loss by machining. An alternative proposed in the framework of the FUI project entitled "airplane floor of the future" is the substitution of the actual extrusion processing by laser beam welding manufacturing. In this context, this PhD thesis aimed at proposing an assembly procedure leading to the manufacturing of welded rail with geometry and dimensions as close as possible to the extruded ones. The welding parameters were optimized to ensure both the strength of and mechanical properties at least equivalent to those of extruded raw.

In the first stage of this study, a design of the rail combined with a value analysis has been undertaken to propose a raw welded geometry in agreement with the specifications of the aviation industry and minimizing both the costs associated with welding and machining. The resulting welded rail consisted of a simple assembly of 5 mm thick plate and 3 mm thick sheets made of two different grades of Ti-6Al-4V. Secondly, a study of the influence of the welding parameters (power, speed, focal length, ...) on the geometry of the weld beads and of the solidification structures was performed. The butt weld tests were conducted on sheets and plates by means of a 10 kW fiber laser. A statistical analysis of the weld defects taking into account of the main welding parameters enabled the determination of a set of optimized parameters for sheets and plates.

Characterization of the microstructure and crystallographic texture of the base materials and weld joints outlined detailed microstructural modifications induced by the laser welding. It has been shown that the heat affected zone can be divided into 4 areas in which distinct mechanisms of microstructural and texture evolutions operate. The size of each heat affected zone could be accurately measured.

Tensile tests performed on the base material and the welded assemblies before and after stress relieving heat treatments were used to characterize the mechanical behavior of the laser welding assemblies. In order to distinguish the behavior of fusion zone (FZ) heat affected zone (HAZ) and base material, the local deformation was measured by an image correlation technique. These measures have clearly shown that the strain levels in the FZ and HAZ are well below those of the base material. Furthermore the ruptured was found to occur in the material with the lowest strength away from the weld bead. Furthermore, the limited deformation in the FZ and HAZ could explain the partial reduction in ductility measured on welded assemblies. The post-welding stress relief heat treatment substantially improved the ductility resulting in a slight increase in the yield strength and the ultimate strength of the welded assemblies.

The results of this study, conducted in a wide range of process parameters and supplemented by data from the literature, allowed to infer relationships between process, microstructure and property of welded joints. It appears that the welding power played a major role and that an increase in the welding speed, because of the low value of the contribution of specific heat transmitted, favored a reduction in the width of the weld bead as well as the size of defects such as root underfills. These results have been complemented by a multivariate statistical analysis with the method of Principal Component Analysis (PCA) to understand the role of all welding parameters on the quality of laser welding.