







Université du Québec  
à Rimouski

**SOUDABILITÉ DES PIÈCES EN ACIER INOXYDABLE 316L  
PRODUITES PAR LA FABRICATION ADDITIVE  
MÉTALLIQUE**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en ingénierie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences appliquées (M.Sc.A)

PAR

© **HAMDI SELMI**

**Mars 2023**



**Composition du jury :**

**Raef cherif, président du jury, Université du Québec à Rimouski**

**Jean Brousseau, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski**

**Véronique Dassylva-Raymond, examinatrice externe, Rio Tinto - Division Aluminium**

Dépôt initial le 26 janvier 2023

Dépôt final le 12 mars 2023



UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI  
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.





## REMERCIEMENTS

En premier lieu, je souhaite remercier mon directeur de recherche Jean Brousseau pour m'avoir guidé, orienté, aidé et conseillé tout au long de mon programme de maîtrise. J'avais aussi l'honneur de collaborer avec vous dans d'autres travaux et faire partie de votre équipe d'enseignement et recherche.

Je souhaite aussi remercier l'entreprise ALSTOM et tout particulièrement Gabriel Caron Guillemette qui était mon référent et mon tuteur de stage au sein de l'entreprise.

Un très grand merci à Charles-André Fraser, avec qui m'a formé sur la EOS M290. Je remercie de même l'équipe encadrante en génie : Suzie Loubet, Denis Labbé, Karel Uhler, Richard Lafrance et Dany Morin. Ils m'ont beaucoup soutenu dans mes expériences pratiques et m'ont aidé à utiliser plusieurs équipements.

Je tiens aussi à remercier Claude Belzile pour tout le temps qui a réservé pour m'assister dans mon étude de microstructure.

Je remercie tous ceux qui ont permis de m'intégrer et de passer une merveilleuse période de ma vie à Rimouski : Yasser, Ahmed, Sofiane, Radouane, Dorra, Laurie, Alisson, Oussema, Yasmine, Amna et Ameni. Sans oublier mes amis à Montréal et Sherbrooke, Aymen, Imed, Sabri, Anas, Khouloud et Farah, j'ai apprécié votre accueil, présence et soutien. Malek, j'attends notre prochaine rencontre avec impatience.

Finalement, j'aimerais remercier mes deux chers parents, Saida et Rachid c'est grâce à vous que je réusis ma vie professionnelle et académique. Ma sœur Rihaab j'ai toujours adoré ton support, Oussema, petit frère je te remercie également pour tes encouragements.



## RÉSUMÉ

La fabrication additive métallique offre une liberté de conception élevée permettant de fabriquer des pièces complexes pour diverses applications industrielles. Ce nouveau procédé permet de créer des produits finis, des pièces s'intégrant dans des assemblages complexes, des pièces de rechange ou des outillages. Le soudage se manifeste comme une solution pour intégrer plus facilement ces pièces dans des assemblages. Le soudage peut également être utile pour imprimer des pièces qui dépassent les limites des machines. En effet, une grande pièce peut être imprimée en plusieurs plus petites composantes pouvant être assemblées par soudage. On peut aussi penser utiliser le soudage pour réparer des pièces imprimées qui ont une grande valeur économique.

L'acier inox 316L est parmi les matériaux les plus utilisés dans le procédé L-PBF, ceci étant dû à sa bonne soudabilité et à ses propriétés mécaniques élevées. Dans le but d'évaluer la soudabilité des composants de fabrication additive, le mémoire présente une étude comparative incluant différentes configurations d'éprouvettes soudées avec la technologie GMAW et non soudées. Les cinq configurations étudiées sont 1) éprouvettes imprimées non soudées, 2) éprouvettes soudées et composées de deux pièces imprimées, 3) éprouvettes composées d'une pièce imprimée et d'une pièce découpée au laser, 4) éprouvettes soudées composées de deux pièces découpées au laser et 5) des éprouvettes non soudées découpées au laser.

Les essais de traction effectués ont confirmé que les pièces en acier inoxydable 316L issues de la fabrication additive pouvaient être soudées et que la résistance du joint soudé était comparable à celle des joints soudés entre des pièces fabriquées avec des procédés conventionnels. En ce qui concerne la fatigue, les résultats montrent que la limite d'endurance des joints soudés entre des pièces de fabrication additive est plus basse d'environ 7%. Toutefois, la différence a été causée par une rupture à petit nombre de cycles et à faible charge. Cette rupture a possiblement été causée par un défaut de soudage ou par des marques de meulage ayant causé l'apparition d'une fissure. Cela mérite d'être validé en appliquant la méthode de l'escalier avec un plus grand nombre de spécimens. Pour toutes les configurations soudées, le profil de dureté diminue dans la zone fusionnée.

En conclusion, les pièces en 316L issues de la fabrication additive L-PBF sont soudables et la résistance des joints soudés ont des valeurs admissibles en statique et en fatigue comparables à celles des joints soudés entre des composants fabriqués avec l'acier 316L laminé à froid.

Mots clés : Fabrication additive, Soudage TIG, 316L, Défauts de soudage, Fatigue, Traction, Micrographie, Micro dureté

## ABSTRACT

Metal additive manufacturing offers high design freedom to manufacture complex parts for various industrial applications. This new process allows the creation of finished products, parts that fit into complex assemblies, spare parts or tooling. Welding is manifested by a solution to integrate these parts more easily into assemblies. Welding can also be useful for printing parts that are beyond the limits of the machines. Indeed, a large part can be printed in several smaller components and assembled by welding. Welding can also be used to repair printed parts that have a high economic value.

Stainless steel 316L is among the most used materials in the L-PBF process, due to its good weldability and high mechanical properties. In order to evaluate the weldability of additive manufacturing components, this paper presents a comparative study including different welded and non-welded specimen configurations using 316L. The five configurations studied were 1) non-welded printed specimens, 2) welded specimens consisting of two printed parts, 3) specimens consisting of one printed part and one laser-cut part, 4) welded specimens consisting of laser-cut parts, and 5) non-welded laser-cut specimens.

The tensile tests conducted confirmed that the additively manufactured 316L stainless steel parts could be welded and that the strength of the welded joint was comparable to that of welded joints between parts manufactured with conventional processes. In terms of fatigue, the results show that the endurance limit of welded joints between additive manufacturing parts is lower by about 7%. However, the difference was caused by a low-load failure that was possibly caused by a welding defect or by grinding marks that led to the initiation of a crack. This would deserve validation by applying the staircase method with a larger number of specimens. For all welded configurations, the hardness profile decreases in the fused area.

In conclusion, the 316L parts from L-PBF additive manufacturing are weldable and the strength of the welded joints have static and fatigue values comparable to those of welded joints between components made with cold rolled 316L steel.

Keywords: Additive manufacturing, TIG welding, 316L, Welding defects, Fatigue, Tensile, Micrography, Microhardness



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ix
RÉSUMÉ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES.....	xv
LISTE DES TABLEAUX.....	xvii
LISTE DES FIGURES.....	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES.....	xxi
LISTE DES SYMBOLES.....	xxiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	25
1.    MISE EN CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE.....	25
2.    PRINCIPAUX TRAVAUX ANTERIEURS.....	27
3.    DEFINITION ET OBJECTIF DU PROJET DE RECHERCHE.....	29
4.    METHODOLOGIE.....	31
5.    PLAN DU DOCUMENT.....	33
CHAPITRE 1 SOUDABILITÉ DES PIÈCES EN 316L PRODUITES PAR LA FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE.....	35
1.1    RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE.....	35
1.2    WELDABILITY OF 316L PARTS PRODUCED BY METAL ADDITIVE MANUFACTURING.....	37
ABSTRACT.....	37
1.2.1 Introduction.....	38
1.2.2 Materials and Methods.....	42
1.2.3 Results and discussion.....	53
1.3    CONCLUSION.....	64

1.4	REFERENCES.....	66
CHAPITRE 2 ANALYSE DES RÉSULTATS DE FATIGUE.....		69
1.5	INTRODUCTION.....	69
1.6	ÉTAT DE SURFACE.....	70
1.7	SOUDAGE ET BAIN DE FUSION.....	72
1.8	MÉTHODE DE SOUDAGE ET MATÉRIEL D'APPORT.....	76
1.9	CONCLUSION.....	78
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		79
ANNEXE I.....		85
ANNEXE II.....		87
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		93



## LISTE DES TABLEAUX

<b>Table 1.</b> Chemical composition of EOS 316L powder. ....	44
<b>Table 2.</b> EOS 316L manufacturing parameters.....	45
<b>Table 3.</b> 316L AM mechanical proprieties measured by the supplier (horizontal mode).....	45
<b>Table 4.</b> Chemical composition of base material for CM parts and specimens.....	46
<b>Table 5.</b> Welding operation mode.....	47
<b>Table 6.</b> Different stresses applied for the determination of the S-N curve.....	52
<b>Table 7.</b> Tensile test results of reference and welded samples. ....	57
<b>Table 8.</b> Tensile test results in a similar study and supplier values for L-PBF material.....	58
<b>Table 9.</b> Roughness measurement after polishing.....	60
<b>Table 10.</b> Estimation of endurance limits .....	60
<b>Table 11.</b> Estimation de la limite d’endurance pour la configuration FA-FA .....	73



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> EOS 316L powder observed with SEM. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 2.</b> EOS 316L powder particle size distribution. The spectra from three measurements are practically overlapping. ....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Figure 3.</b> Additive manufacturing specimen preparation, (a) STL file preparation with EOSPRINT, (b) Parts building, (c) Finished print, (d) Parts cutting, (e) Supported surface machining .....	45
<b>Figure 4.</b> GMAW-P welding drawing .....	45
<b>Figure 5.</b> Welding jig: 1) Copper plate 2) Specimens welding side 3) Clamping part 4) Clamps 5) Groove. ....	49
<b>Figure 6.</b> Distortion measurement example of AM-AM traction sample after welding.....	58
<b>Figure 7.</b> Geometry of samples for tensile test. ....	58
<b>Figure 8.</b> Geometry of samples for fatigue test.....	58
<b>Figure 9.</b> Microhardness and micrography samples. ....	58
<b>Figure 10.</b> Welded joint macro and micrography: (a) AM-AM (b) CM-CM (c) CM-AM (d-g) spatters (e) AM-AM fusion zone (f-i) HAZ CM side.....	58
<b>Figure 11.</b> Microstructure of cross-section of welded samples: (a-b-c) higher magnification of welded cross sections, (d-e-f-i) fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ), (g-h) conventional and additive manufacturing base material.....	58
<b>Figure 12.</b> Microhardness profile (HRC) of cross-section welded samples, (a) CM-AM configuration, (b) CM-CM configuration, (c) AM-AM configuration.....	58
<b>Figure 13.</b> Tensile test results of reference and welded samples.....	58
<b>Figure 14.</b> Tensile test results in a similar study and supplier values for L-PBF material.....	59
<b>Figure 15.</b> Stress-strain tensile curves of reference and welded samples. ....	59

<b>Figure 16.</b> Fatigue finite life range: (a) Non-welded specimens (CM, AM), (b) Welded parts (CM-CM, CM-AM, AM-AM). .....	61
<b>Figure 17.</b> SEM images exhibiting the fracture surfaces of fatigue-tested AM-AM specimen: (a) macrography of the crack initiation (b) Fracture micrography on the welding surface, (c) Failure surface macrography, (d) Porosity in the failure surface. ....	62
<b>Figure 18.</b> Failure surfaces at the staircase method: (a) AM-AM specimen fractured at (N: 1 757 738 cycle, $\sigma_a$ : 87.85 MPa), (b) AM-AM specimen fractured at (N: 239 732 cycle, $\sigma_a$ : 67.85 MPa). ....	63
<b>Figure 19.</b> Mesure de rugosité des éprouvettes de fatigue .....	70
<b>Figure 20.</b> Éprouvette de fatigue FA-FA avant et après l'élimination du cordon de soudage .....	71
<b>Figure 21.</b> Position de rupture d'une éprouvette de fatigue FA, N= 1 856 921 .....	77
<b>Figure 22.</b> Surface de rupture des spécimens de fatigue: (a) FA-FA avec N=239 732, (b) FA-FC avec N=1 281 278, (c) FC-FC avec N= 1 166 824.....	75
<b>Figure 23.</b> Comparaison des limites ultimes .....	76
<b>Figure 24.</b> Comparaison des limites élastiques .....	77
<b>Figure 25.</b> Comparaison des allongements à la rupture .....	77

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

<b>FA</b>	Fabrication additive
<b>3D</b>	Trois Dimensions
<b>FAM</b>	Fabrication Additive Métallique
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>L-PBF</b>	Laser Powder Bed Fusion
<b>EBM</b>	Electron Beam Melting
<b>GTAW-P</b>	Pulsed Gas Metal Arc Welding
<b>OVAT</b>	One Variable AT Time
<b>TIG</b>	Tungsten Inert Gas
<b>LFW</b>	Linear Friction Welding
<b>FSW</b>	Friction Stir Welding
<b>DFM</b>	Design For Manufacturing
<b>IPPD</b>	Integrated Product and Process Development
<b>MAM</b>	Metal Additive Manufacturing
<b>DED</b>	Direct Energy Deposition

<b>CR</b>	Cold Rolled
<b>AM</b>	Additive Manufacturing
<b>CM</b>	Conventional Manufacturing
<b>SEM</b>	Scanning Electron Microscopy
<b>HCF</b>	High Cycle Fatigue
<b>WMZ</b>	Weld Melt Zone
<b>HAZ</b>	Heat Affected Zone

## LISTE DES SYMBOLES

### Unités géométriques

<b>μm</b>	Micromètre
<b>mm</b>	Millimètre
°	Degré (mesure d'angle)

### Unités de temps

<b>s</b>	Seconde
<b>Hz</b>	Hertz

### Force, contrainte, pression, Dureté

<b>N</b>	Newton
<b>MPa</b>	Mégapascal
<b>Hz</b>	Hertz
<b>HRC</b>	Dureté Rockwell C

### Puissance

<b>W</b>	Watt
----------	------

### Éléments chimiques

<b>Fe</b>	Fer
<b>Cr</b>	Chrome
<b>Ni</b>	Nickel
<b>Mo</b>	Molybdène
<b>C</b>	Carbone
<b>N</b>	Azote
<b>Mn</b>	Manganèse
<b>Cu</b>	Cuivre
<b>P</b>	Phosphore
<b>Autres</b>	
<b>%</b>	Pour cent
<b>mm/s</b>	Millimètre par Seconde



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1. MISE EN CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE LA RECHERCHE

Dès son invention pendant les années 1980 [1], la fabrication additive (FA), connue aussi sous l'appellation impression tridimensionnelle (3D), était principalement exploitée pour le prototypage rapide [2]. L'évolution de la technologie a aussi amené le développement d'une variété de matériaux (polymères, céramiques et métaux, etc.) pouvant être utilisés pour la construction des pièces de haute complexité et possédant des propriétés mécaniques comparables et parfois améliorées par rapport aux méthodes de fabrication conventionnelles [3].

L'ASTM définit la fabrication additive (FA) comme un procédé de fusion de matériaux, généralement couche après couche, pour créer des objets à partir de modèles numériques 3D [4].

La fabrication additive métallique (FAM) se manifeste par différentes technologies ayant pour matière première de la poudre fine qui permet de fabriquer des pièces par des procédés de fusion ou d'adhésion (laser, faisceau d'électrons, jet de liant/frittage au four, dépôt d'énergie, etc.). La technique la plus courante est la fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion). Ce procédé comporte deux technologies, la première est la L-PBF fusionnant la poudre métallique avec une source laser et la deuxième est la fusion par faisceau d'électrons (EBM : Electron Beam Melting).

La commercialisation des machines de FAM capables de réaliser des pièces fonctionnelles répondant aux exigences des cahiers de charges a poussé les industries automobiles, aéronautiques et médicales à intégrer ce procédé dans leurs chaînes de production. En plus de pouvoir fabriquer des pièces dont le degré de complexité est élevé, la

FAM offre l'opportunité de concevoir des pièces optimisées en termes de poids grâce à leur forme et aux évidements intérieurs faciles à créer avec un procédé de construction couche par couche. Les avantages de FAM représentent un aspect déterminant dans de nombreuses applications. De plus avec le développement de ces techniques, de nouvelles applications apparaissent [5], ce qui motive les acteurs industriels à investir dans ce domaine. Toutefois, pour garantir la rentabilité de cette approche de fabrication, des défis conceptuels et opératoires se présentent également. Pensons seulement aux modèles numériques qui doivent s'adapter à la fabrication additive (direction de construction, supports, etc.) ce qui implique parfois l'implantation d'un nouveau design différent à celui de base, adaptable aux procédés de fabrication conventionnels.

Mis à part les nouveaux défis de conception, le temps d'exécution des pièces de FAM est long en comparaison avec les autres procédés comme l'usinage, le moulage et le la mise en forme. Pour cette raison, le coût des pièces produites par la fabrication additive est considérablement élevé. En effet, comme la majorité des systèmes exécute la construction des pièces couche après couche, la hauteur des pièces a produite est le facteur principal influençant le temps machine, la quantité de poudre et la quantité de gaz de protection à utiliser. Par conséquent, il serait pertinent d'étudier les possibilités d'assemblage des composants de FAM. L'idée consiste à subdiviser les grandes pièces en plusieurs parties et de les joindre ensuite. Souvent et par obligation, la production des pièces de grandes dimensions n'est pas possible étant donné l'espace limité de travail de la machine. Dans ce cas, deux approches peuvent se présenter [6] : la première est de subdiviser la pièce, exploiter la FA juste pour la partie complexe et fabriquer le reste par des procédés conventionnels. Par contre, la deuxième consiste à générer les différents morceaux d'une pièce par FA et à les assembler afin d'obtenir la pièce complète. Dans les deux options, une stratégie est requise pour joindre les morceaux. Habituellement, l'assemblage avec des joints boulonnés est sans doute la méthode la plus utilisée. Dans certaines applications, il se peut que ce type de connexion ne réponde pas aux besoins. Même si le soudage peut faire partie de la solution, l'emploi de ce moyen d'assemblage n'est pas courant étant donné la nouveauté de la FA et parce que l'on n'ose pas souder les pièces critiques fabriquées par ce procédé. Les recherches

effectuées sur ce sujet sont limitées ce qui fait qu'on ne connaît pas l'effet que peut avoir le soudage sur les propriétés mécaniques des pièces.

## **2. PRINCIPAUX TRAVAUX ANTERIEURS**

Malgré leur nombre limité, les recherches effectuées sur le sujet du soudage des pièces issues de la fabrication additive métallique ont traité différents exemples de technologie de fabrication additive, de matériaux et de stratégies de soudage. En effet, la fabrication additive est un procédé similaire au soudage parce que dans les deux cas on introduit assez d'énergie pour fusionner les matériaux. Dans les études effectuées, la fusion sur lit de poudre (PBF : Powder Bed Fusion) est le procédé le plus employé, ceci se justifiant par la maturité de ce procédé par rapport aux autres approches, sa capacité d'obtenir des pièces de haute densité (moins de porosité) [7] et son exploitation par les acteurs industriels.

Lors du soudage hétérogène manuel GMAW (Gas Metal Arc Welding) entre des pièces fabriquées par le procédé L-PBF et des pièces conventionnelles (forgés) en acier inoxydable 316L, Huysmans et *al.* [8] ont démontré la bonne qualité du soudage hétérogène en se basant sur différents procédés de qualification usuels : visuel, pénétration du liquide et examen radiographique. Les propriétés mécaniques statiques des spécimens se sont avérées satisfaisantes. Sans aucun post-traitement effectué, les essais de traction ont montré que la rupture avait lieu dans la partie conventionnelle.

Laitinen [9] a aussi investigué la résistance des soudures entre des pièces fabriquées par des procédés conventionnels dans des barres en acier 316L laminé à froid et des pièces imprimées avec le procédé L-PBF dans le même matériau. Le procédé de soudage laser est utilisé dans cette recherche. Le diamètre de la fibre optique, la puissance et la vitesse de laser étaient les variables du plan d'expérience basé sur la méthode OVAT. Comme conclusion l'auteur confirme que l'énergie utilisée pour le soudage n'a pas eu d'effet significatif sur la résistance à la rupture, par contre une diminution de l'allongement à la rupture était observée pour les spécimens soudés.

Dans leur étude et comme dans la recherche précédente, Ville-Pekka et al. [10] ont effectué un plan expérimental en faisant varier l'énergie de soudage par laser. Les expériences ont ciblé la comparaison entre le soudage homogène des pièces en 316L de FA par L-PBF et celui des pièces en 316L fabriquées par des moyens conventionnels dans des barres d'acier laminées à froid. La pénétration du bain de fusion a été évaluée et les résultats du plan expérimental indiquent que l'obtention d'une pénétration complète est possible avec un minimum d'énergie de soudage appliqué. L'efficacité de la fusion faisait aussi l'objet de cette recherche et les mesures ont montré qu'avec des apports d'énergie plus faibles, le matériau de FA fond plus efficacement que celui laminé à froid.

La recherche de Andrea et al. [11] avait comme objectif d'inspecter la qualité et l'effet de soudage entre des pièces de FA en aluminium (AlSi10Mg) et en titane (Ti6Al4V). Deux techniques de soudage ont été utilisées, le soudage par friction linéaire (LFW : Linear Friction Welding) et par friction malaxage (FSW : Friction Stir Welding). Le joint obtenu était exempt de défauts macroscopiques et la porosité était plus petite que celle obtenue avec des pièces fabriquées par des moyens conventionnels. Les auteurs supposent que le soudage par friction est approprié pour souder des pièces en aluminium fabriquées par l'impression 3D malgré qu'il apporte des transformations microstructurales.

Dans une autre étude, Mokhtari et al. [12] ont conduit des essais pour comparer les propriétés mécaniques du soudage des pièces en acier 316L laminé à froid à celui des pièces 316L fabriquées additivement par la technique L-PBF. Une variation significative de la dureté a été observée au niveau de la zone affectée thermiquement des spécimens FA par rapport aux spécimens fabriqués par des moyens conventionnels. Pour les deux configurations, les essais de traction montrent une rupture dans la zone de fusion. En effet, le soudage a eu un faible impact sur le comportement élastique et sur le durcissement. Une variation de dureté est observée dans la zone affectée thermiquement et dans la zone fusionnée. Une baisse de la ductilité d'environ 30% par rapport au métal de base a été observée. Même si la rupture s'est produite dans la zone de fusion dans les deux cas, la

position de rupture est localisée dans la zone de fusion pour les différentes configurations soudées.

Il semble donc pertinent d'étudier profondément les propriétés mécaniques des configurations soudées homogènes et hétérogènes incluant des pièces de FA. La pertinence est d'autant plus importante que le nombre d'études traitant de ce sujet est limité. En outre, aucune étude n'a présenté des résultats découlant d'essais sur des assemblages soudés intégrant au moins une pièce de FA à des sollicitations cycliques (fatigue). Pour qualifier des pièces de FA soudées, il faut qualifier le soudage des pièces issues de la FA et cela passe nécessairement par des essais en fatigue. À notre connaissance, il n'y a pas d'études décrivant le comportement en fatigue de pièces issues de la FA et soudés.

### **3. DEFINITION ET OBJECTIF DU PROJET DE RECHERCHE**

L'intégration de la fabrication additive augmente de plus en plus dans les secteurs industriels et cela rend le besoin d'intégrer les pièces métalliques de FA dans des sous-assemblages. Selon « Wöhler Report 2013 », 17.5% des pièces imprimées en 3D sont intégrées dans des assemblages. Le partenaire industriel lié à ce projet de recherche ALSTOM n'échappe pas à ce mouvement et souhaite étudier la possibilité d'utiliser la soudure pour assembler ou réparer des pièces fabriquées par impression 3D dans ses pratiques de production. Actuellement, le partenaire n'autorise pas le soudage des pièces métalliques imprimées parce qu'il existe trop d'inconnues par rapport au comportement sous charge de ce type d'assemblage.

Comme déjà mentionné, le procédé de fabrication additive s'apparente au procédé de soudure parce que dans les deux cas il y a fusion et durcissement rapide des matériaux. En principe, les pièces de fabrication additive sont soudables, mais, dans le cas d'application critique ou semi-critique, la résistance des soudures et la valeur des admissibles pour un matériau donné peuvent varier beaucoup selon la technique de soudage employée, la technologie de FA utilisée et les traitements thermiques appliqués.

Dans d'autres situations, le soudage pourrait aussi servir à la réparation de pièces de FA. Dans leur recherche, Liu et al. [13], discutent du potentiel de réparation des composants aéronautiques de haute performance obtenus par fabrication additive qui sont parfois mis au rebut à cause d'endommagement par fatigue dans des endroits où il serait possible de les réparer par soudure. Les auteurs illustrent les avantages des différents procédés utilisant la FA pour la réparation en montrant des exemples de réparations dans le domaine aéronautique. Toute fois plusieurs défis futurs sont évoqués à ce propos.

Pour les raisons mentionnées ci-dessus, le projet vise l'étude de la soudabilité des pièces en acier inoxydable 316L produites par L-PBF avec la technologie EOS : M290. Pour ce faire, des joints soudés homogènes composés de deux pièces de FA et des joints soudés hétérogènes composés d'une pièce de FA et d'une pièce fabriquée par découpe laser seront produits et testés. Le projet propose d'inclure les configurations de référence suivantes :

- Des spécimens soudés composés de deux pièces fabriquées par le procédé conventionnel de découpe laser et soudées par GMAW ;
- Des spécimens non soudés fabriqués par le procédé conventionnel de découpe laser ;
- Des spécimens fabriqués par la technologie L-PBF non soudés.

Le but principal du projet est de conduire une étude comparative entre les configurations soudées intégrant au moins une pièce de FA les configurations de référence. La revue de littérature démontre qu'il y a assez peu d'études sur le sujet et la question mérite d'être étudiée. Le projet est composé de trois objectifs principaux :

#### 1- Étude de propriétés mécaniques

Le premier objectif est d'investiguer le comportement statique et en fatigue des spécimens non soudés et soudés afin de déterminer les propriétés statiques, la limite d'endurance et les courbes SN de chaque configuration. Les résultats vont permettre de comparer les admissibles des cinq configurations et ainsi de pouvoir fournir une réponse à la question de la soudabilité des pièces en acier inoxydable 316L produites par la fabrication

additive métallique et pouvant être utilisées dans des assemblages soudés et des applications critiques ou semi-critiques.

## 2- Étude exploratoire de la qualité de soudage

Le deuxième objectif est d'inspecter les différentes zones du matériau avant et après le soudage afin d'évaluer la qualité des soudures. Des macrographies et micrographies aideront à comprendre les résultats des essais mécaniques.

## 3- Étude du profil de dureté dans les soudures des spécimens

Le troisième objectif est de vérifier l'influence du procédé de soudage GMAW sur les mesures de la microdureté dans les différentes zones des spécimens.

## 4. METHODOLOGIE

Après la présentation des différentes recherches antérieures aidant à mieux orienter notre projet et la définition des objectifs, une méthodologie est implantée dans le but d'élaborer l'étude expérimentale et définir les différents critères de comparaison entre les configurations.

La méthodologie suivie lors du projet se compose de cinq grandes étapes : 1) la revue de littérature, 2) La fabrication des spécimens (impression 3D , découpe laser, soudage et mesure de distorsion), 3) la réalisation des essais mécaniques (traction, fatigue) des 3 configurations de références, 4) la réalisation des essais mécaniques des configurations soudées incluant au moins une composante fabriquée par la technologie L-PBF, 5) la réalisation des essais de microstructure et de micro dureté pour toutes les configurations. L'observation des faciès de rupture et l'étude macro et micrographique des soudures font aussi partie de ce travail.

Dans la première étape, la revue de littérature permet d'exploiter et classer les travaux effectués dans le soudage des pièces issues de la fabrication additive métallique. Elle présente aussi les différentes techniques de soudage et les matériaux traités. Finalement, cette

revue souligne et justifie les objectifs à atteindre et les enjeux liés à l'assemblage des pièces FA.

Dans la deuxième étape la préparation des éprouvettes s'est déroulée, deux lancements d'impression 3D ont été fait pour obtenir les échantillons FA. Les spécimens sont fabriqués avec la machine EOS M290 qui utilise le procédé L-PBF, la matière première est la poudre en acier inoxydable EOS 316L. Pour les éprouvettes conventionnelles ils ont été découpés par laser. Après la fabrication des demi-éprouvettes, le soudage GMAW bout à bout est effectué pour obtenir les configurations soudées. Une mesure de distorsion est faite par la suite pour chaque lot d'éprouvettes.

Dans la troisième étape, des essais statiques (traction) et dynamiques (fatigue) sont effectués afin de déterminer les propriétés mécaniques des différentes configurations non soudées .

Dans la quatrième étape les mêmes essais sont faits avec les mêmes équipements pour les configurations soudés. .

Pour ces deux dernières étapes, les essais de traction s'appuient sur la norme ASTM E8/E8M. Lors des essais, un extensomètre a été installé afin de mesurer les premiers 20% d'allongement. Les essais de fatigue et en se basent sur les normes ISO 12107 : 2003 et ASTM E466-15, trois niveaux de charge ont été appliqués afin d'illustrer le domaine d'endurance limité. Ensuite, la limite d'endurance est déterminée à l'aide de la méthode de l'escalier mentionné dans les normes. Un chargement sinusoïdal à contraintes décalées de rapport de contrainte  $R=0,5$  a été appliqué dans tous les essais de fatigue. Tous les essais ont été réalisés dans les mêmes conditions. Les éprouvettes ont toutes été soudées avec la même technologie de soudage. Elles ont aussi été polies afin de ne pas introduire des variations causées par l'état de surface et la méthode de soudage.

Dans la cinquième étape, on s'intéresse à la qualité des soudures. On observe l'allure extérieure des soudures à l'aide de macro et de micrographie. Dans cette étape, on mesure l'évolution du profil de dureté dans le joint dans des coupes transversales des échantillons



soudés. Des images microscopiques permettent également de voir l'impact du soudage sur la microstructure des métaux de base et du métal d'apport. Après leur rupture, quelques éprouvettes de fatigue servent à l'observation macroscopique des faciès de rupture afin de critiquer le soudage, justifier les nombres de cycles obtenus durant l'essai et comparer les différents modes de rupture.

## **5. PLAN DU DOCUMENT**

Ce mémoire regroupe un article scientifique présenté dans le premier chapitre. Dans cet article on présente la méthodologie détaillée ainsi que les différents résultats des essais de traction, des essais de fatigue, des mesures de microdureté et les micrographies de la microstructure des matériaux. L'article se termine par une discussion qui conduit à une comparaison des résultats obtenus dans le cadre de cette étude avec ceux trouvés dans la littérature.

Un deuxième, chapitre complémentaire au premier, met en évidence les résultats obtenus lors des essais de fatigue incluant une partie comparative entre les surfaces de ruptures de trois configurations et trois essais en fatigue. Le chapitre s'intéresse à évaluer l'impact des différents facteurs pouvant influencer les résultats obtenus par la méthode de l'escalier.

Finalement la conclusion générale du mémoire synthétise les différents résultats obtenus et présente la conclusion ainsi que les perspectives pour la suite des travaux.



# **CHAPITRE 1**

## **SOUDABILITÉ DES PIÈCES EN 316L PRODUITES PAR LA FABRICATION ADDITIVE METALLIQUE**

### **1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE**

Le procédé de fabrication additive métallique (FAM) propose plusieurs technologies innovantes telles que la fusion sur lit de poudre ou l'énergie thermique est apportée par un laser ou par un faisceau d'électrons. La complexité des pièces produites et leurs propriétés mécaniques comparables aux procédés de fabrication conventionnels sont parmi les avantages de cette technique. Mis à part le prototypage, les secteurs d'application industriels majoritaires de la FAM sont l'aéronautique, le spatial, l'automobile et le biomédicale.

L'une des contraintes liée à cette technologie concerne les dimensions maximales des pièces qu'on peut produire vu la surface limitée du plateau d'impression. D'autre part, le coût de fabrication des pièces est élevé par rapport aux procédés ordinaires étant donné le prix des machines et la faible vitesse d'impression. Dans le cas des pièces de grande taille et de forme complexe, on peut subdiviser la composante, imprimer les sous-composantes et procéder à leur assemblage afin d'obtenir le résultat escompté. Dans de nombreuses autres situations, la conception de sous-assemblage conduit à des pièces de formes complexes faisant appel à la FA et à des pièces pouvant être fabriquées par les procédés conventionnels. Le recours à des moyens d'assemblage est alors nécessaire. Actuellement, le soudage est encore assez peu utilisé pour assembler des composants de FA, surtout dans le cas d'assemblages critiques ou semi-critique, parce qu'il y a assez de données disponibles relativement au comportement des soudures sur des pièces de FA. En l'absence de données fiables, plusieurs donneurs d'ordre interdisent l'utilisation du soudage sur des pièces de FA. C'est le cas du partenaire ALSTOM qui mentionne dans sa norme sur la FA que le soudage ne peut être utilisé pour assembler ou réparer de telles composantes.

Ce contexte soulève la question de la soudabilité des pièces imprimée en 3D avec une autre pièce de FA ou avec des pièces fabriquées par des moyens conventionnels. Ce travail cherche à étudier la soudabilité des pièces produites par fabrication additive afin d'évaluer et comparer les propriétés mécaniques avant et après cette opération d'assemblage.

Quelques recherches examinant ce sujet ont montré la possibilité de faire la connexion par soudage. Par contre, ces études, encore très limitées, ne présentent pas une grande diversité de matériaux, de procédés de soudage et d'essais mécaniques. On ne retrouve pas

dans la littérature des études portant spécifiquement sur le comportement en fatigue de joints soudés intégrant au moins un composant de FA.

En se basant sur les résultats trouvés, le soudage des pièces en 316L produites par la fabrication additive peut être une des solutions d'assemblage. Les essais de traction et de fatigue des configurations comprenant au moins une moitié additive soudée ont montré un comportement comparable au soudage de 316L conventionnel. Il a été aussi conclu que les défauts de soudages sont responsables sur les ruptures rapides et inattendues des éprouvettes soudées. La zone fusionnée marque les valeurs de dureté les plus basses dans les différentes configurations. Les résultats ont aussi montré que le matériaux FA est plus dure que le conventionnel.

Mots-clés : Fabrication additive, Soudage, 316L, Limite ultime, Limite d'endurance

Cet article est intitulé « Soudabilité des pièces en 316L produites par la fabrication additive métallique ». La rédaction a été réalisée sous la supervision du professeur Jean Brousseau. Dans sa version finale, il a été soumis pour publication en 2023 dans le Journal of Manufacturing and Materials Processing (JMMP). Faire une revue de littérature, vérifier les différentes études de cas effectués, planifier et élaborer les essais mécaniques, récolter les résultats et rédiger l'article représentent ma contribution dans ce projet. Le professeur Jean Brousseau a proposé l'idée de ce travail et il en a supervisé la réalisation. Il a également contribué à la gestion des résultats et la révision du manuscrit. Comme le projet est en collaboration avec le groupe ALSTOM, la définition des différentes étapes a été discutée avec les participants industriels, Gabriel Caron-Guillemette, Stéphane Goulet et Jacques Desjardins qui ont aussi contribué respectivement à assister à la préparation des éprouvettes (comme le soudage et une partie de l'usinage a été effectué à l'usine de ALSTOM, La Pocatière, proposer et valider le plan d'expérience et discuter la méthodologie des essais mécaniques y compris celles de fatigue). Les essais micrographiques ainsi que la distribution granulométrique de la poudre ont été fait avec le soutien de Claude Belzile à l'Institut des Sciences de la Mer de Rimouski (ISMER).

## 1.2 WELDABILITY OF 316L PARTS PRODUCED BY METAL ADDITIVE MANUFACTURING

Hamdi Selmi<sup>1</sup>, Jean Brousseau<sup>1</sup>, Gabriel Caron-Guillemette<sup>2</sup>, Stéphane Goulet<sup>3</sup>, Jacques Desjardins<sup>3</sup> and Claude Belzile<sup>4</sup>

*1* Département de mathématiques, informatique et génie, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Qc, Canada

*2* Alstom Transport Canada, La Pocatière, Qc, Canada

*3* Alstom Transport Canada, St-Bruno, Qc, Canada

*4* Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, Qc, Canada

### ABSTRACT

The processes of metal additive manufacturing (AM) are no longer confined to rapid prototyping applications and are increasingly used in many fields for the production of tools and finished products. The ability to design parts with practically zero-waste, high precision, complex geometry, and on-demand fabrication are among the advantages of this manufacturing approach. One of the drawbacks of this technique is the productivity rate, as the parts are made layer by layer, which also increases the production cost. Moreover, even the working space is limited, especially for the powder bed fusion technique. In view of these disadvantages and in order to guarantee the profitability of this process, it should be oriented to the production of complex components having a limited volume with a design adapted to additive manufacturing. One solution to circumvent these drawbacks is to combine the 3D printing process with conventional manufacturing processes. When designing products, one may choose to use additive manufacturing to create locally complex parts and assemble them with parts produced by conventional processes. On the other hand, and due to the limited AM printing chamber space, it may be necessary to print large parts in multiple smaller parts and then assemble them. In order to investigate the weldability of stainless steel 316L parts produced by laser powder bed fusion (L-PBF), the mechanical behavior of different welding assemblies is tested. Five configurations are studied: non-welded AM specimens, two AM parts welded together, one AM part and one laser cut part welded together, two laser-cut parts welded together, and non-welded laser cut specimens. Welding is performed using the Pulsed Gas Metal Arc Welding process (GMAW-P). Specimen strength is assessed through static

and fatigue tests. The results demonstrate that 316L AM parts are weldable, and the tensile and fatigue properties of L-PBF 316L welded components and welded laser cut components are comparable. GMAW-P welding led to lower fatigue results for AM components than for other configurations, but the difference is not important. It was observed that welding defects may have a direct impact on mechanical properties.

**Keywords:** additive manufacturing; gas metal arc welding; mechanical properties; stainless steel

### 1.2.1 Introduction

The contribution of additive manufacturing (AM) to the practice of creating commercial products has progressed enormously over the last 30 years. ASTM International now defines additive manufacturing as a process of merging materials, usually layer upon layer, to create objects from 3D digital data models [1]. AM is a promising technique that offers the possibility of creating fully functional parts in one operation without wasting much raw material. A major benefit of this technology is the elimination of constraints related to DFM (Design for Manufacturing) [2]. In relation to the Integrated Product and Process Development approach, two AM design strategies were suggested by Klahn et al. [3], “manufacturing-driven design strategy” and “function-driven design strategy”. The first one remains faithful to the conventional design approach, however, the second one proposes an improved design and increases the functionality of the product. In addition to enhancing part design, the development of this technology has resulted in the production of a variety of materials including metals, ceramics, polymers, and composites with mechanical properties (static and dynamic) comparable and sometimes improved compared to conventional manufacturing methods [4, 5].

Metal applications in AM technology are increasingly popular. The literature presents four developed techniques to fabricate metal components: direct energy deposition, powder

bed fusion, sheet lamination, binder jetting and cold spray deposition [6,7]. Due to their higher technology readiness levels (TRL) and high-density rate (near full density) [8], direct energy deposition (DED) and powder fusion are the two dominant AM technology families. The first consists of spraying the metal fed in powder or wire form on a laser source to form the part. One of its important advantages is that the DED effector can be fixed in a multiaxial machine, which allows for the building of parts without the need for support structures [2, 9, 10]. The second family is powder bed fusion (PBF) among which we find Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), and Electron Beam Melting (EBM). These processes are capable of manufacturing high quality and complicated geometry metal parts based on a wide variety of metals and alloys, such as carbon steel, stainless steel (316L, 17-4 PH), aluminum (AlSi10Mg, Al2139), and titanium (Ti64, TiGr5). The PBF process is based on the creation of layers (sections) 20 to 150  $\mu\text{m}$  thick. The energy source (laser or electron beam) fuses the powder of each superimposed 2D profile to build the complete part. Several experimental studies have focused on the mechanical properties of the parts produced by these technologies. The results show that the properties of parts are comparable or even better than those manufactured by conventional processes like cold rolling, casting, laser cutting and forging [11].

However, the PBF process has some drawbacks: the deposition rate of the process is low because printers build parts one layer at a time, the price of L-PBF machines is high because it is a new process, the print volume limits the overall dimensions of the printed elements, and the AM process requires parts to be supported during printing which increases post-processing time. Despite these disadvantages, PBF printing is gaining ground among all manufacturing processes. In order to guarantee the technical contribution and economic profitability of AM, the process should be used mainly for parts with high geometric complexity and limited dimensions. It is often observed that additive manufacturing allows the number of parts in an assembly to be reduced by increasing the complexity and functionality of products, which minimizes the number of assembly operations required. Ana et al. [12] present the industrial applications of metal AM which are based mostly on automotive, aerospace, and industrial machines. They demonstrate that this technology is

mainly used to enrich subassemblies with highly complex parts that can be joined mostly by mechanical solutions such as bolting and clamping. In addition, geo-metrically complex parts that are too large to be printed can be subdivided and assembled. AM is therefore a good mean to save manufacturing costs and improve the functionality of an assembly when it is used for the best it has to offer.

Improving the functionality of an assembly by integrating AM parts may save on manufacturing costs. When integrating AM parts into a new product, different means of assembly may be used, including welding. However, welding is very rarely used as a means of joining AM parts, perhaps due to a lack of studies and research on the subject [13,14,15]. To determine the eligibility and reliability of this approach, it becomes necessary to study the possibility of joining by welding two AM parts or one AM part with one CM (Conventional Manufacturing) part. In principle, since 3D printing is a process similar to welding, most materials used in additive manufacturing should be weldable. Different research projects have been undertaken using materials such as stainless steel, aluminum, and titanium [14,16,17]. Liu et al. [18] also present the idea of repairing the process of aerospace parts through the welding of AM. For some applications, the cost of some parts and subassemblies is high. Rather than replacing them, repair using welding can be a solution to increase service life. For example, a cracked additive manufacturing part could be repaired to lengthen its life span. To increase the use of additive manufacturing, process and assembly methods must become better known, easier to use and more productive.

Experiments with laser welding and 316L stainless steel have shown the ease of having full weld penetration of AM parts compared to CM parts [13]. The authors pointed out that the much rougher and matte surface of AM parts induces a higher absorption rate and explains the full penetration that can be created with less laser power compared to rolled or machined parts. However, there is very little information on the welding of additively manufactured stainless-steel parts. In another research study and based on a comparative study between laser-welded CM and PBF components made of 316L stainless, Mokhtari et al. [14] observed a significant hardness variation in the heat-affected zone of AM welded



parts compared to conventional CM welded parts. The authors investigated the mechanical behavior by conducting tensile tests. For all samples, failure occurred in the fusion zone. The test specimens showed an elastoplastic behavior and a large ductility. In order to inspect the welding quality of AM components, Andrea et al. [19], evaluated the microstructure of AM parts made of Ti6Al4V titanium and AlSi10Mg aluminum welded respectively by Linear Friction Welding (LFW) and Friction Stir Welding (FSW). In both cases, the observed joint was free of defects. The authors interpreted that friction welding does not significantly affect mechanical properties such as hardness, although it does cause a microstructure transformation. The weldability by gas tungsten arc welding GTAW of 316L PBF components welded to a conventional 316L wrought component was investigated by Huysmans et al. [15]. Without any post-processing, the results obtained confirm that the welded parts have satisfactory tensile mechanical properties. The specimens fractured in the conventional metal. Heterogenous GTAW welding was also studied by Laitinen et al. [20]. The authors noted that joining cold rolled and AM 316L parts provides good quality welds having a better ultimate tensile strength than the AM base metal. Depending on welding speed, the rupture occurred in the welded metal at a welding speed of 1000 mm/min and in PBF metal at higher speeds.

In the various studies carried out, the process used to manufacture the specimens was mainly powder bed fusion [13,14,15,20], while keeping the scanning parameters (power and laser speed) according to the recipes recommended by the suppliers. The relationship between construction parameters, microstructures, and mechanical properties were studied [21, 22, 23]. In order to assess weldability, different aspects were observed including tensile, corrosion, hardness, and microstructure tests. Despite the importance of fatigue resistance, there are no studies on the subject of fatigue life prediction of welded AM parts with heterogeneous parts.

316L stainless steel (UNS S31603) is an austenitic steel (cubic face centered structure) used for many applications requiring high corrosion resistance and high mechanical properties. Compared to carbon steels (AISI1010, AISI1018) and alloy steels (AI-SI4130,

AISI8620) this steel contains a large amount of Cr and Ni. The Ni content stabilizes the austenitic phase at low temperatures and improves corrosion resistance [14]. The 316L is also known for its low carbon content, which is preferable when welding these materials, as it reduces intergranular corrosion of welds and heat-affected zones caused by the precipitation of carbides [24]. In powder form, 316L is widely used for additive manufacturing because of its low thermal conductivity, low sensitivity to oxygen and high absorption at infrared wavelengths [25]. 316L is used in several AM processes like DED, L-PBF and cold spray [15,26,27]

Additive manufacturing is a highly digital process; its combination with laser welding is interesting as the two processes are similar in terms of precision and fusion method. However, for some applications, manual welding may be more practical, such as field repairs or working in crowded spaces. Indeed, AM is more oriented for a limited number of products so the combination with GMAW-P (Pulsed Gas Metal Arc Welding Process) is relevant. Welding also enables to combine several AM parts to form a larger assembly.

The aim of this study is to investigate the weldability of L-PBF AM parts made of 316L stainless steel through the manual welding technique GMAW-P. In order to investigate the weldability of 316L stainless steel parts produced by the laser powder bed fusion (LPBF); the mechanical properties of different welding assemblies are tested. Five configurations are studied: non-welded AM specimen, AM parts welded together, one AM part welded with one laser cut rolled part (AM-CM), laser cut rolled parts welded together (CM-CM), and non-welded laser cut rolled specimens (CM). The five configurations are compared by performing fatigue and tensile tests, as well as establishing the microhardness profile and assessing the weld quality through micrographic and macrographic observations.

### **1.2.2 Materials and Methods**

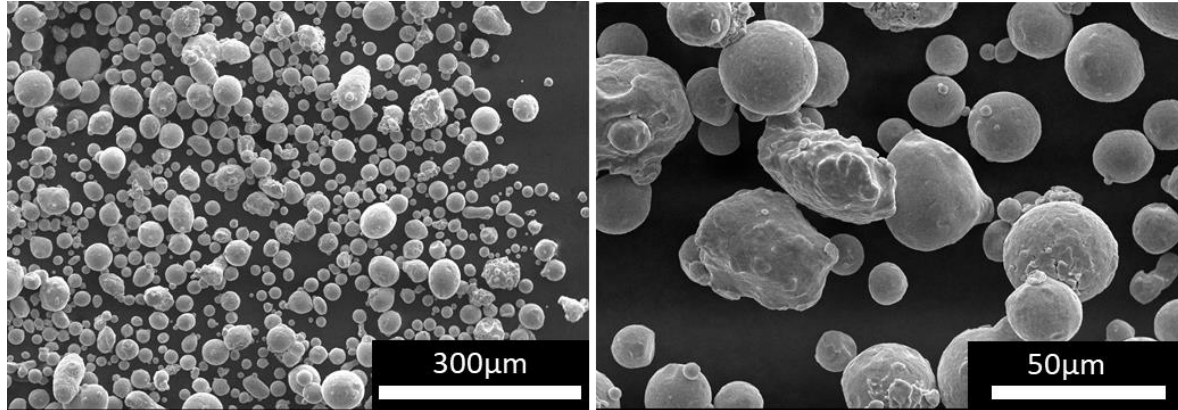
The research project consists in testing welded and non-welded 316L specimens. The non-welded specimens are 3D printed and laser cut. The welded specimens are made from

three configurations: AM-AM, CM-CM and AM-CM. Therefore, a test plan targeting the mechanical properties of the different groups of specimens is conducted.

#### 1.2.2.1 Test pieces fabrication

For this study, EOS 316L powder is used. At the beginning of the project, the dispenser was filled with a batch of fresh powder. The powder was then recycled from one print to the other without adding fresh powder. Between each print, the used powder was sieved with an 80  $\mu\text{m}$  sieve and mixed with the remaining powder in the dispenser. Figure 1 shows images of the powder taken with a scanning electron microscope (SEM) (NanoImage SNE 4500M). The size of most of the powder grain size is between 30  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$ , as shown, and some particles are merged. A Malvern Panalytical Mastersizer 3000 particle size analyzer was used to determine the particle size distribution of the powder. Three measurements were done and the d-values D10, D50 and D90 of the particle size distribution are respectively 18.5  $\mu\text{m}$ , 35.6  $\mu\text{m}$  and 65.3  $\mu\text{m}$  (see Figure 2), where D10, D50 and D90 give the maximal particle size diameter that includes 10%, 50% and 90% of the particles (volume weighted basis) respectively.

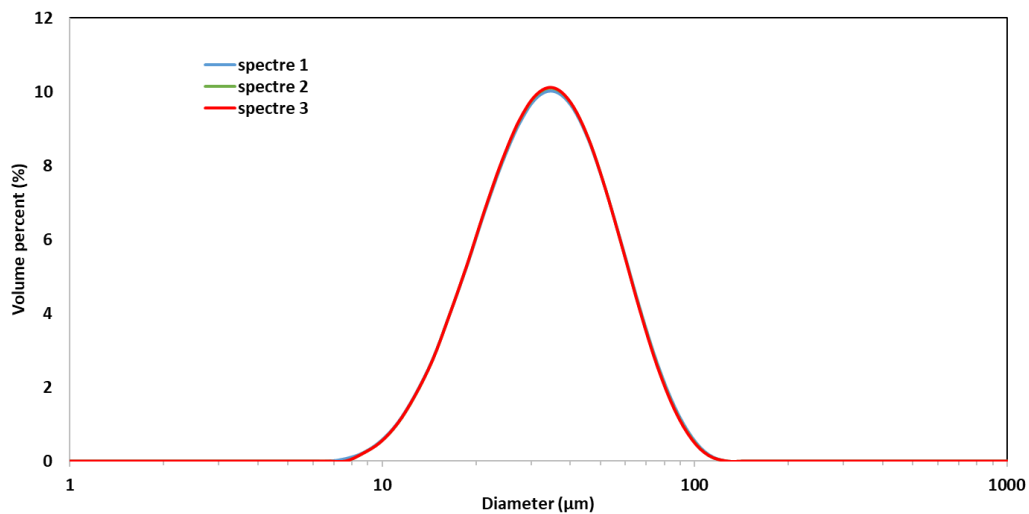
According to EOS, the chemical composition of this powder is given in Table 1. Although the mechanical properties of 316L stainless steel printed parts have already been investigated [28], this study redoes the tests in order to compare with literature and welded configurations.



**Figure 1.** EOS 316L powder observed with SEM.

**Table 1.** Chemical composition of EOS 316L powder.

Fe	Cr %	Ni %	Mo %	C %	N %
Balance	18.00	14.00	2.5	≤0.03	≤0.10



**Figure 2.** EOS 316L powder particle size distribution. The spectra from three measurements are practically overlapping.

The additive manufactured full specimens and half specimens are made with the EOS M290 machine based on L-PBF technology. The manufacturing of the specimens was executed in three builds. The samples were constructed on a steel build plate and manufactured in a horizontal orientation ( $0^\circ$ ) relative to the build plate. The supports used for printing the specimens were solid and 4 mm high. The printing process took place under Argon to protect the melt from oxidation and the maximum oxygen content was under 1.3%.

Table 2 presents the printing parameters used to manufacture the AM specimens, as defined by EOS.

**Table 2.** EOS 316L manufacturing parameters

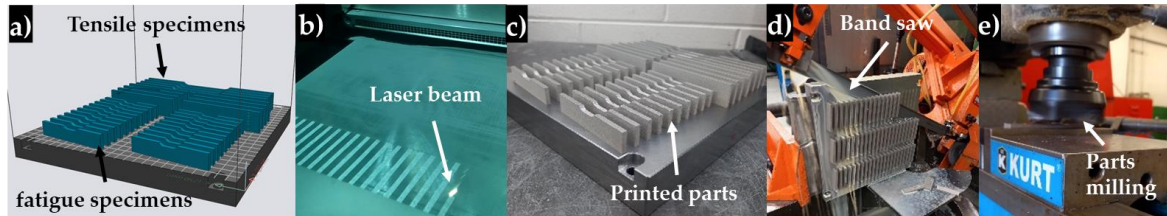
Laser Power[W]	Laser velocity [mm/s]	Layer thickness[ $\mu\text{m}$ ]	Hatch distance [mm]
195	1083	20	0.09

Figure 3 shows the different stages of the additive manufacturing process of specimens from digital preparation with EOSPRINT to surface machining post-treatment via the printing process and part cutting. Then, both the top and bottom sides were machined to have a similar surface finish (see Figure 3). In this study, because the specimens will be welded, no heat treatment was applied. The powder supplier mentions that heat treatment is optional and proposes a stress relief and solution annealing. With the same manufacturing conditions and without any heat treatment, the mechanical properties measured by EOS are shown in Table 3.

**Table 3.** 316L AM mechanical proprieties measured by the supplier (horizontal mode).

Yield stress (MPa)	Ultimate Tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)
540	640	40

Conventional specimens (half and full specimens) were provided by a local laser cutting and metal processing company. Table 4 shows the elementary composition of a conventional 316L sheet of metal according to the manufacturer mill test report.



**Figure 3.** Additive manufacturing specimen preparation, (a) STL file preparation with EOSPRINT, (b) Parts building, (c) Finished print, (d) Parts cutting, (e) Supported surface machining.

**Table 4.** Chemical composition of base material for CM parts and specimens.

Fe	Cr%	Ni%	Mo%	C%	N%	Mn%	Cu%	P%
Balance	16.58	10.03	2.01	0.01	0.05	1.17	0.51	0.02

#### 1.2.2.2 Test pieces welding

Welding was performed by GMAW-P. This welding process was based on the recommendation of the industrial partner. Although laser welding is more efficient, manual GMAW-P welding is widely used in manufacturing industries and it represents the most probable technique for field repairs situations. The welding parameters are shown in Table 5.

**Table 5.** Welding operation mode.

Filler metal	Gas flow	Gas	Backing	Transfer mode
EN ISO 14343-A-G 18 8 MN	30-45 cfh	98%Ar+2%C O <sub>2</sub>	Copper	Pulsed
Current	Voltage	Advance speed	Filler wire diameter	Amperage
DC (el.+)	20 V	8.12 m/min	1 mm	180 A

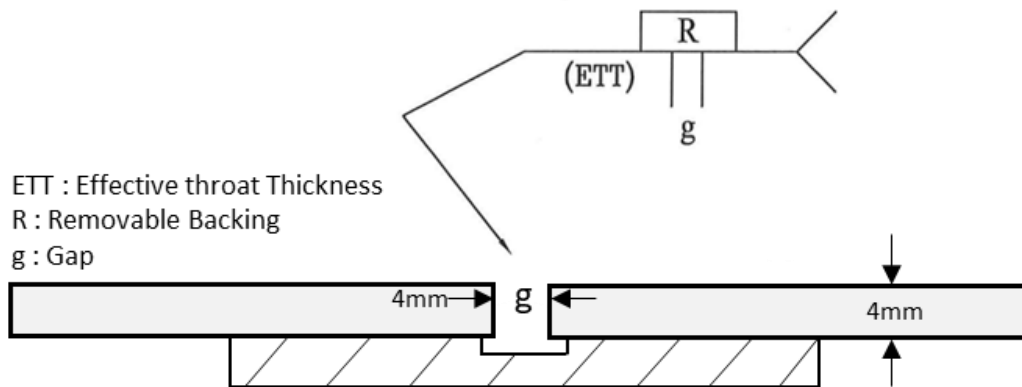
The filler metal used is EN ISO 14343-A-G 18 8 MN, manufactured by Lincoln Electric, its mechanical properties are as follows: Yield Strength 414 MPa; Tensile Strength = 607 MPa; Elongation = 37%.

To be more efficient, it was proposed to weld many specimens at a time, for this reason the half AM and CM pieces were designed as rectangular shapes. This choice ensures that the specimens, stacked side by side, are in contact during welding and minimize the welding path discontinuity. It also provides a means to minimize the number of weld imperfections that may occur at the start and stop of weld segments.

The specimens used to evaluate the AM-AM, CM-CM and AM-CM configurations are butt welded and the final geometry is designed according to the ISO 9692-1:2013 standard.

The specimens were welded at the factory of the project industrial partner (ALSTOM Transport Canada, La Pocatière, Québec). Each welding batch contained parts of the same configuration. For each configuration a total of 3 tensile and 20 fatigue specimens are prepared. Based on the welding operation mode and in order to eliminate welding defects and ensure complete penetration, the specimens were supported by a copper plate with a gap

in the middle, which increased the melt volume. The spacing between the pieces (root opening) was equal to 4 mm (see Figure 4).

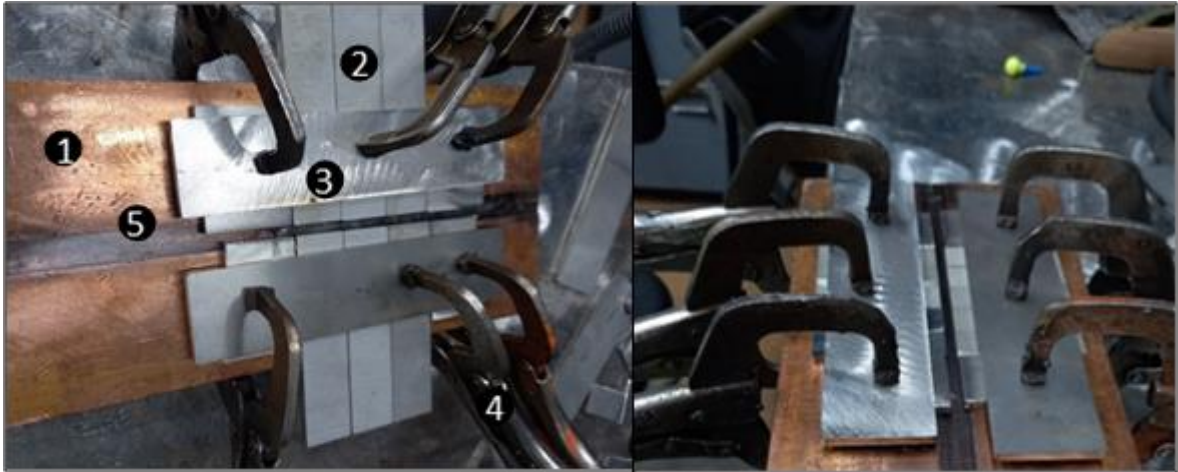


**Figure 4.** GMAW-P welding drawing

Usually, the weld bead presents some anomalies at the beginning and at the end. In order to have repeatable welding results for the test specimens, stainless steel pieces of the same thickness as the test specimens were inserted at the beginning and at the end of each welding batch to provide run-on and run-off tabs at the weld ends, as suggested per good industrial practice. The jig contained clamps to fix the half specimens, avoid slight movements during welding and reduce the angular distortion.

Before welding the test specimens, some samples were welded in order to confirm the welding procedure, evaluate the quality of welding and measure distortion of the welded specimens. Figure 5 shows the assembly used for welding these specimens. According to a visual inspection, the preliminary results did not show any defects such as lack of penetration and cracks. The used welding procedure met the requirements and offered results in accordance with the AWS D15.1 standard. After welding, specimens were separated from each other using cutter wheel tool.



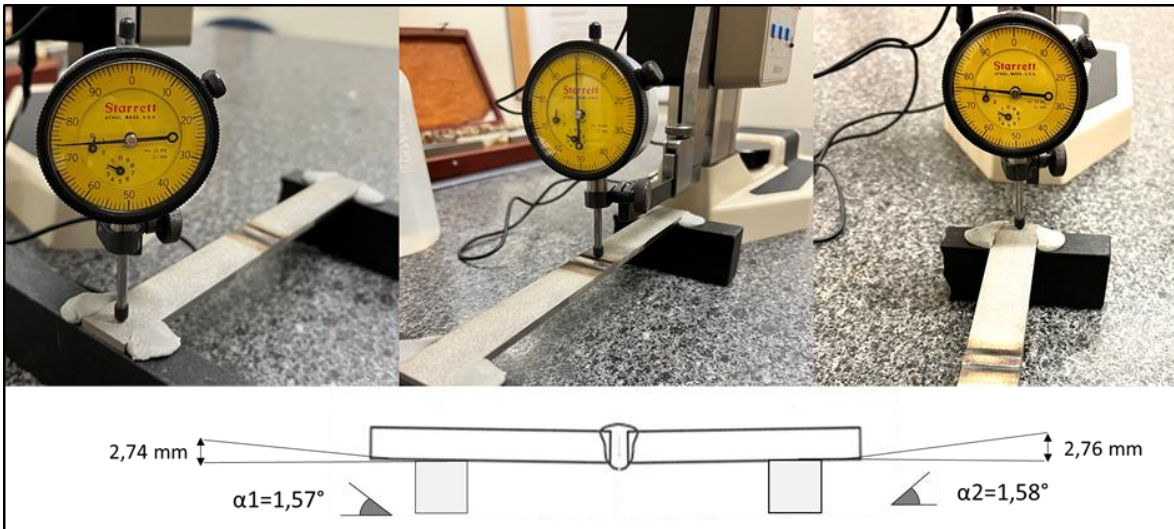


**Figure 5.** Welding jig: 1) Copper plate 2) Specimens welding side 3) Clamping part 4) Clamps 5) Groove.

#### 1.2.2.3 Angular distortion measurement of the specimen

Since welding is performed from one side, and as a result of the heat imposed during welding, an angular deformation was expected. Since the top side receives more heat, it becomes concave and the back-side convex. Sung-Wook Kang [29] studied the effects of angular distortion on stress concentration and fatigue life. It has been demonstrated that fatigue cracks appear on the welding side (surface where the welding is applied). In order to quantify the impact of this phenomenon on mechanical tests, angular distortion was measured using a dial indicator.

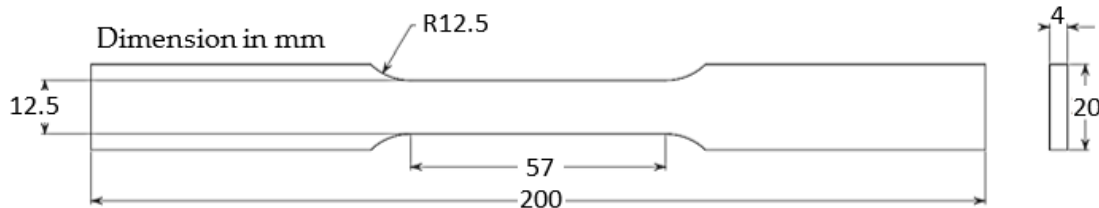
The measurements were taken on a batch of three specimens. The elevation was measured at both ends and in the centre. The values were converted into an angular deformation which varied from  $0.12^\circ$  to  $0.37^\circ$  for the fatigue specimens and from  $1.21^\circ$  to  $1.65^\circ$  for tensile specimens (see Figure 6). As this deformation is similar for all configurations, it was not considered as part of the study.



**Figure 6.** Distortion measurement example of AM-AM traction sample after welding

#### 1.2.2.4 Tensile test protocol

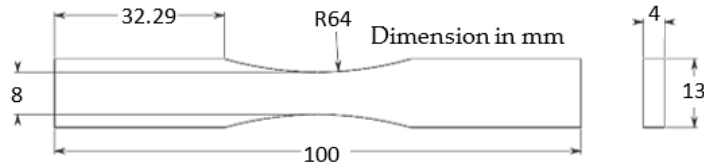
According to the ASTM E8/E8M, tensile testing was performed by milling on standard rectangular samples. This choice ensures ease of printing and material support removal. Specimen dimensions in mm after post-treatment are shown in Figure 7. To assess the repeatability of the test, four tensile specimens were prepared for each configuration. The tensile tests were performed on an MTS 809 tensile testing machine, the test speed was set to 0.025 mm/s and the pressure applied by the clamping dies was equal to 2000 MPa in order to avoid any slippage.



**Figure 7.** Geometry of samples for tensile test

### 1.2.2.5 Fatigue test protocol

Axial fatigue test specimens were prepared in accordance with the ASTM E466-15 standard. A sketch of the fatigue specimens highlighting their dimensions in mm is shown in Figure 8.



**Figure 8.** Geometry of samples for fatigue test

The tests were performed at 20 Hz under a stress ratio of  $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = 0.5$ . Two million cycles was considered a runout. The minimum and maximum stresses are calculated using the nominal stress formula  $\sigma = F/A$  where  $F$  is the minimum or maximum applied force and  $A$  the smallest cross sectional area of the specimen. Fatigue results are presented as a function of the alternating stress,  $(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})/2$ .

The S-N curve is divided in two regions: finite and infinite life. For the finite portion of the curve, 9 samples were used and 3 load levels were considered for each configuration. Applied loads were established as a fraction of the ultimate tensile strength, (see Table 6). With the endurance limit at 2 million cycles, we used the staircase method based on Dixon and Mood method and as defined by ISO 12107: 2003 and tested 9 samples for each configuration. The alternate stress increases or decreases with a step size equal to 10 MPa depending on whether the specimen survives or breaks. As suggested in the NF A03-405 application guide, the step of increase or decrease corresponds to 10 MPa for welded samples. The estimates of mean fatigue strength at 2 million cycles and its standard deviation for the different configurations are based on the formula presented by Snyder et al. [30].

Table 6 presents the different levels of the alternating stresses applied in the finite life region for the 5 configurations.

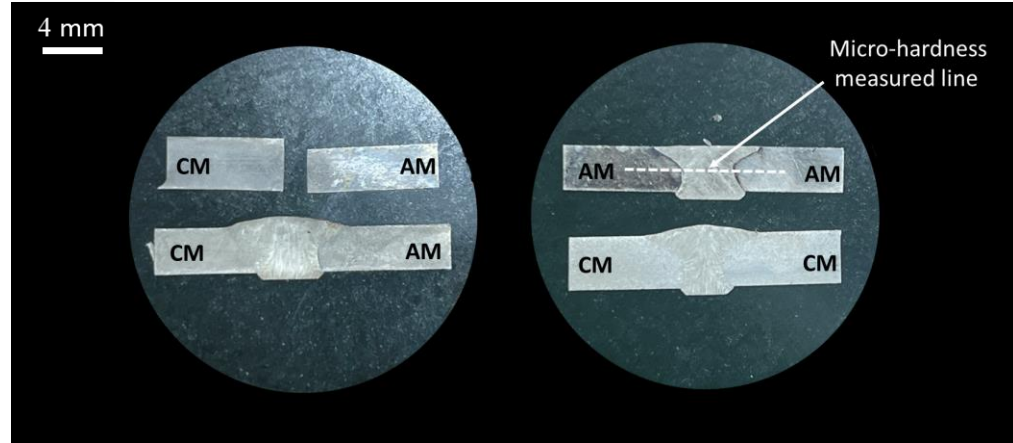
**Table 6.** Different stresses applied for the determination of the S-N curve.

	CM	AM	CM-CM	AM-AM	CM-AM
Applied alternate	155.58	148.61	142.32	140.96	141.63
stresses	135.11	140.99	135.06	127.27	130.18
(MPa)	126.10	130.92	126.05	113.24	114.04

#### 1.2.2.6 Micrographic observation and microhardness test protocol

The microhardness measurements are performed with a CLEMEX automated tester. The samples are cut, coated and polished to avoid the effect of surface roughness (Figure 9). The scale used is Rockwell C (HRC) with a diamond indenter. The measurement method follows the ASTM E18 standard. The profiles were taken on a cross-section (perpendicular to the welding direction).

For micrographic observation, the specimens used for microhardness measurements were repolished. For cross-section observations, the surfaces were etched with “Kalling’s reagent #2”, which is the solution mentioned in the supplier's documents (EOS). A NanoImage SNE 4500M scanning electron microscope (SEM) was used for micrographic observations.



**Figure 4.** Microhardness and micrography samples.

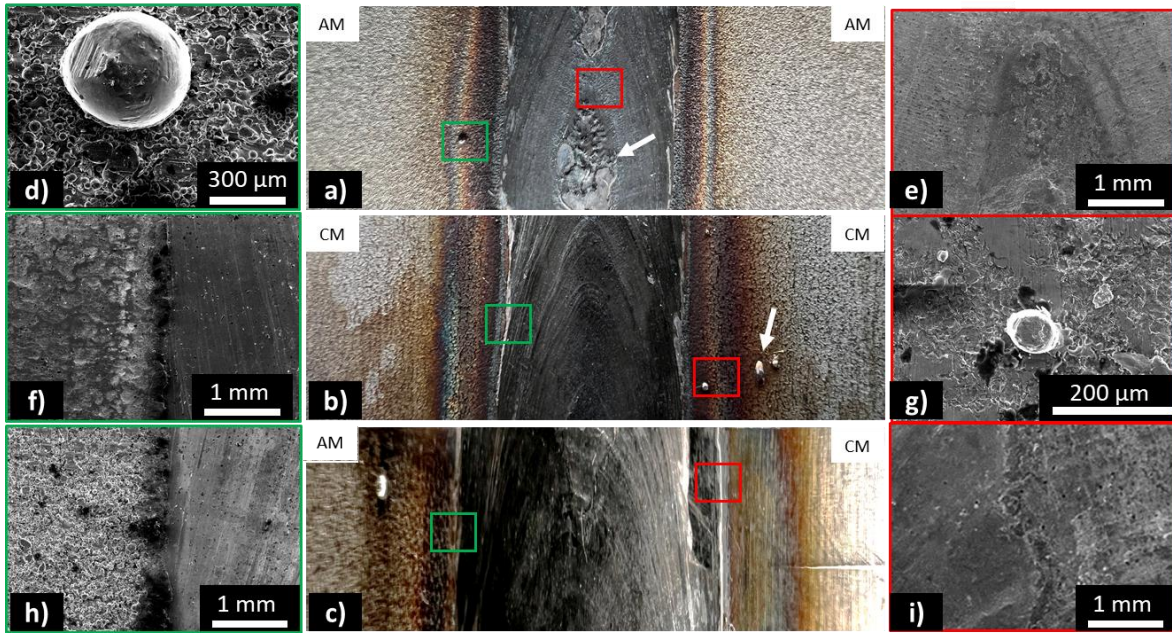
### 1.2.3 Results and discussion

#### 1.2.3.1 Micrography

Figure 10 shows typical micrography of the welded specimens. The three typical metallurgical zones are visible: base material (BM), fusion zone (FZ), and heat affected zone (HAZ). After visual inspection as demonstrated in Figure 10, the samples did not represent cracks, which is in accordance with results seen in the literature [2, 18, 31, 32]. It was observed that there were some spatters (see white arrows) on the additive and conventional sides (Figure 10, a-b-c-d-g).

The granulated texture observed on the additive side is due to the last layer of powder that is not fully fused to the part during the L-PBF process (Figure 10, h-d). Based on the observations, for both materials (AM and CM), the texture in the HAZ is similar to the one of base material (BM). The grains morphology is characterized by an equiaxial granulometry in the BM and a directional grain growth in the FZ.

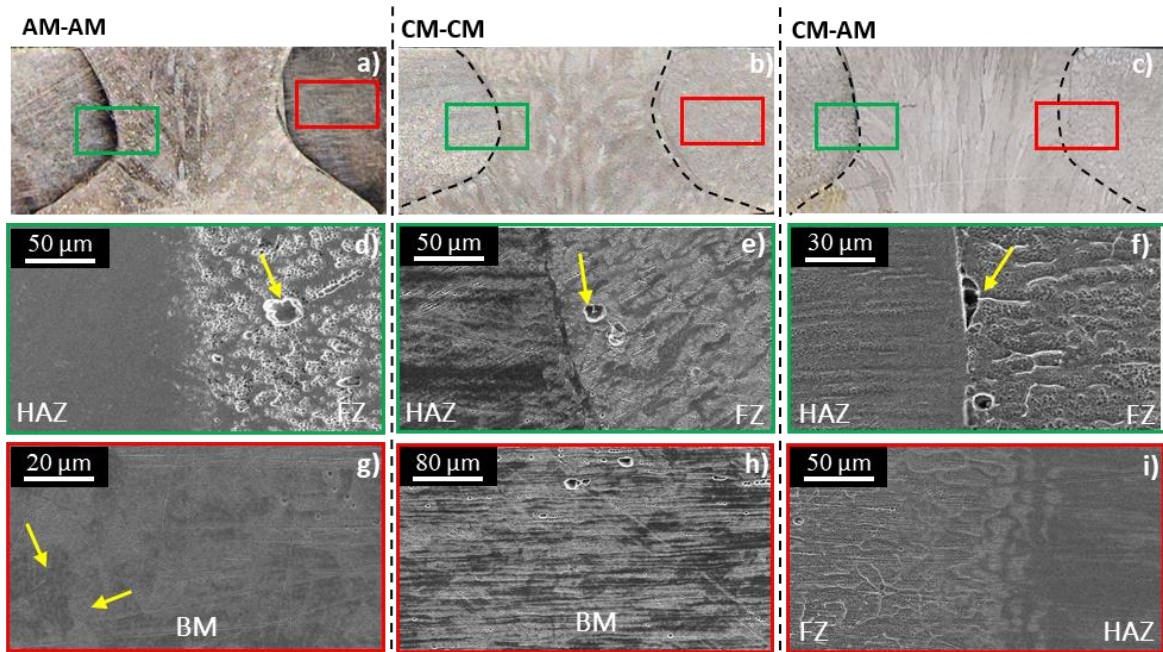
Visually, we can say that the welding method does not present any surface quality issues that could affect the mechanical properties in any of the configurations.



**Figure 10.** Welded joint macro and micrography: (a) AM-AM (b) CM-CM (c) CM-AM (d-g) spatters (e) AM-AM fusion zone (f-i) HAZ CM side.

For welded configurations, cross-sections were observed with SEM. Figure 11 presents the results of these observations. The three metallurgical zones listed below are visible (Figure 11, a-b-c). By observing the images of the two base materials (Figure 11 g-h), we can see that both conventional and AM materials contain partial porosity. CM material exhibits a typical cold-rolled microstructure, where the direction of the rolling can be clearly seen (Figure 11, h). It is also visible that the fusion zone is similar on both the AM and CM sides (Figure 11, f-i-h). The latter contains some pores (Figure 11, d-e). Some anomalies of material discontinuity were detected at the transition from the fused zone to the HAZ of the conventional side in the case of heterogenous welding (Figure 11, f). The width of HAZ varies between 2 and 3 mm for all the configurations. The surface of the AM base material (Figure 11, h) presents a typical micrography of the parts resulting from the L-PBF process

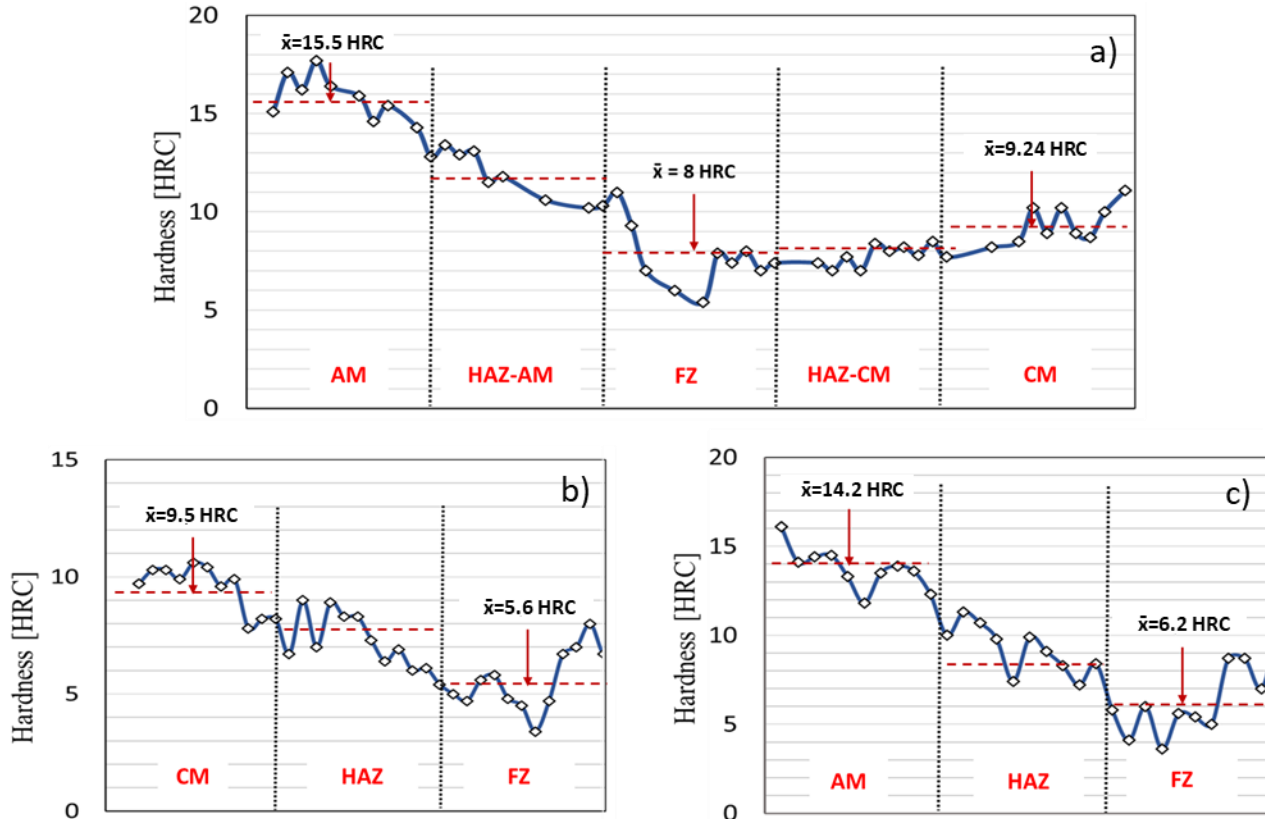
(layer by layer). Similar images were presented in the study of Laitinen et al. [20] and in the technical data sheet of the EOS powder.



**Figure 11.** Microstructure of cross-section of welded samples: (a-b-c) higher magnification of welded cross sections, (d-e-f-i) fusion zone (FZ) and heat-affected zone (HAZ), (g-h) conventional and additive manufacturing base material.

#### 1.2.3.2 Microhardness

Based on the microhardness measurements along the cross-section welded specimens shown in Figure 12, it is remarkable that welding decreases the microhardness values as it approaches the welded joint. Figures 12-b and 12-c show just half of the measurements because the welding is homogeneous, and the two half curves are similar. By looking at the average hardness value, the microhardness decrease is more significant for AM welded parts than for CM welded specimens, 56% (14 HRC to 6.2 HRC) compared to 40% (9.5 HRC to 5.6 HRC), (Figure 12, b-c). For the AM-CM configuration, the tested specimen shows a smaller microhardness in the fusion zone than those of the two base materials. A difference of 7.5 HRC for the AM side compared to 1.1 HRC for the CM side. These microhardness variations are consistent with the results found in the literature [14,30].



**Figure 12.** Microhardness profile (HRC) of cross-section welded samples, (a) CM-AM configuration, (b) CM-CM configuration, (c) AM-AM configuration.

### 1.2.3.3 Tensile test

For each configuration, three tests were carried out. Average values of ultimate tensile strength, yield stress, and elongation at rupture are shown in Table 7 and Figure 13. Figure 15 presents one of the three tensile test curves for each configuration. The tested specimens showed elastoplastic behavior with high ductility. The extensometer used has an elongation capacity of 20%. As a result, the values of elongation at break were deducted from machine actuator displacement. Even if the values are not precise, this method provides a good approximation of elongation at break. As Table 7 and Figure 13 shows, good reproducibility was observed. The non-welded AM specimen shows higher yield stress, lower ultimate tensile strength, and higher elongation at break than non-welded conventional specimens.



Compared to the non-welded specimens, all the welded configurations show a decrease in the elongation at break and yield stress. The ductility average of the welded configurations has established a 28% loss compared to the non-welded configurations. Regarding ultimate tensile strength, the results do not show a significant difference between non-welded and welded specimens.

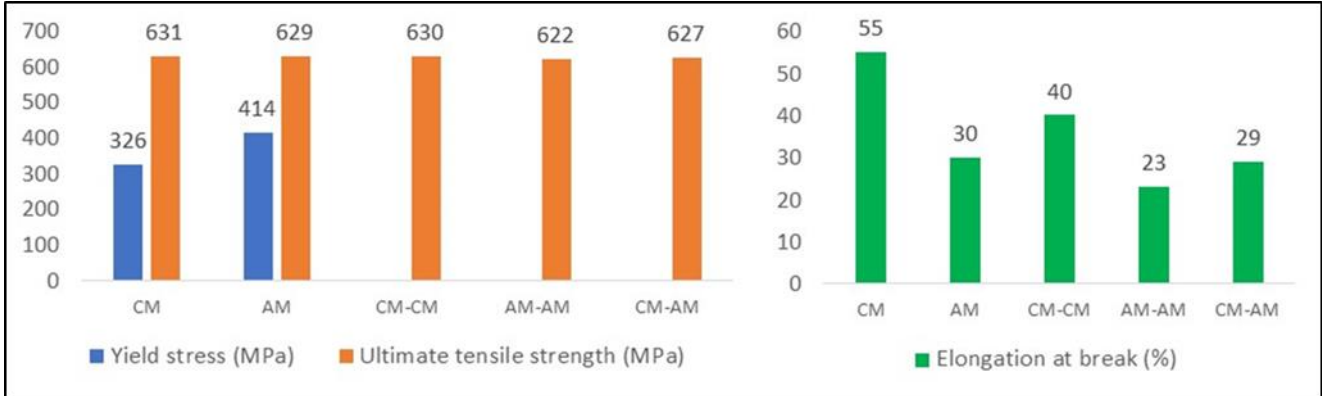
Table 8 and Figure 14 show comparable values from the powder supplier EOS and from Mokhtari et al. [14]. For non-welded AM specimens, the results found in this study are lower than those mentioned in the EOS specifications, although the difference is very low (2%) for the ultimate stress. For convention material, except for the elongation at break, which is lower in our study, the results are comparable with the Mower et al. study [28].

For the welded configurations, the values are comparable and even partially better than those found in the study Mokhtari et al. [14], (see Table 8). In comparison to our study, Mokhtari et al. [14] did not use the same filler material and welding method, which may explain why our results differ from theirs.

**Table 7.** Tensile test results of reference and welded samples.

	CM	AM	CM-CM	AM-AM	CM-AM
Yield stress (MPa)	326±1	414±3	-	-	-
Ultimate Tensile strength (MPa)	631±2	629±1	630±5	622±2	627±4
Elongation at break (%)	55±4	30±1	40±12	23±4	29±2
Failure position	Base metal		Welded material		

For all the values presented in the table, the tolerance intervals are equal to:  $\pm (X_{max} - X_{min})/2$ .

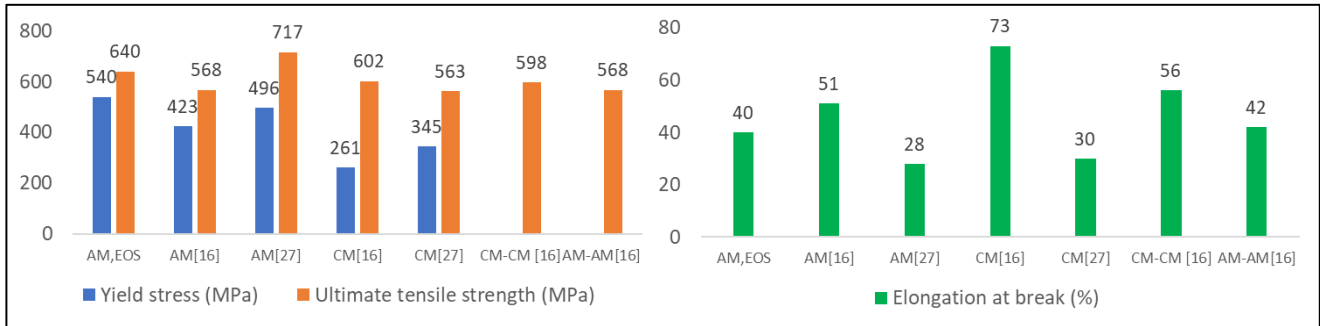


**Figure 13.** Tensile test results of reference and welded samples.

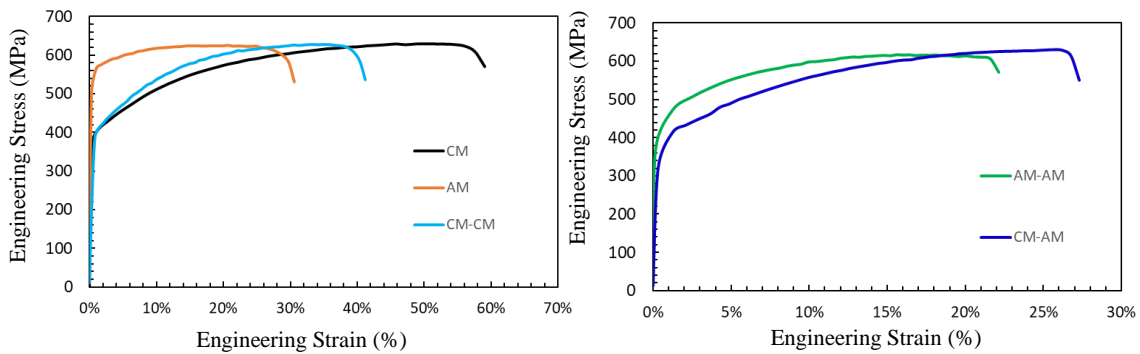
The results of the tensile tests are consistent with those found in the microhardness tests. In the fused zone, the material is softer, which explains the lower ultimate limit after welding. It was also noticed that the values obtained are better than those of the filler material even if the rupture happened in the weld bead. In fact, in the fusion zone a mixture of materials will be created with different proportions, which can explain this increase [16]. In addition, the effect of rapid cooling during welding can be a factor.

**Table 8.** Tensile test results in a similar study and supplier values for L-PBF material.

	AM EOS	AM [14]	AM [28]	CM [14]	CM [28]	CM-CM [14]	AM-AM [14]
Yield stress (MPa)	540	423 ± 5	496	261 ± 19	345	-	-
Ultimate tensile strength (MPa)	640	568 ± 5	717	602 ± 2	563	598 ± 3	568 ± 2
Elongation at break (%)	40	51 ± 1	28	73 ± 6	30	56 ± 3	42 ± 14



**Figure 14.** Tensile test results in a similar study and supplier values for L-PBF material.



**Figure 15.** Stress-strain tensile curves of reference and welded samples.

#### 1.2.3.4 Fatigue test

For all configurations, the stress values retained for the fatigue tests are based on the ultimate tensile strength obtained from the tensile tests. The different load levels used in our fatigue tests were chosen as a percentage of the ultimate tensile strength. In order to minimize the effect of surface finish, especially since the specimens come from different manufacturing processes, manual polishing on the machined surfaces was performed on all specimens undergoing the fatigue test. As an indication, the roughness average measured with a roughness tester for CM-CM and AM-AM welded parts are shown in Table 9.

**Table 9.** Roughness measurement after polishing

Specimen	Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	Ra2 ( $\mu\text{m}$ )	Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	Mean
CM-CM	0.75	0.64	0.67	0.69
AM-AM	0.79	0.61	0.77	0.72

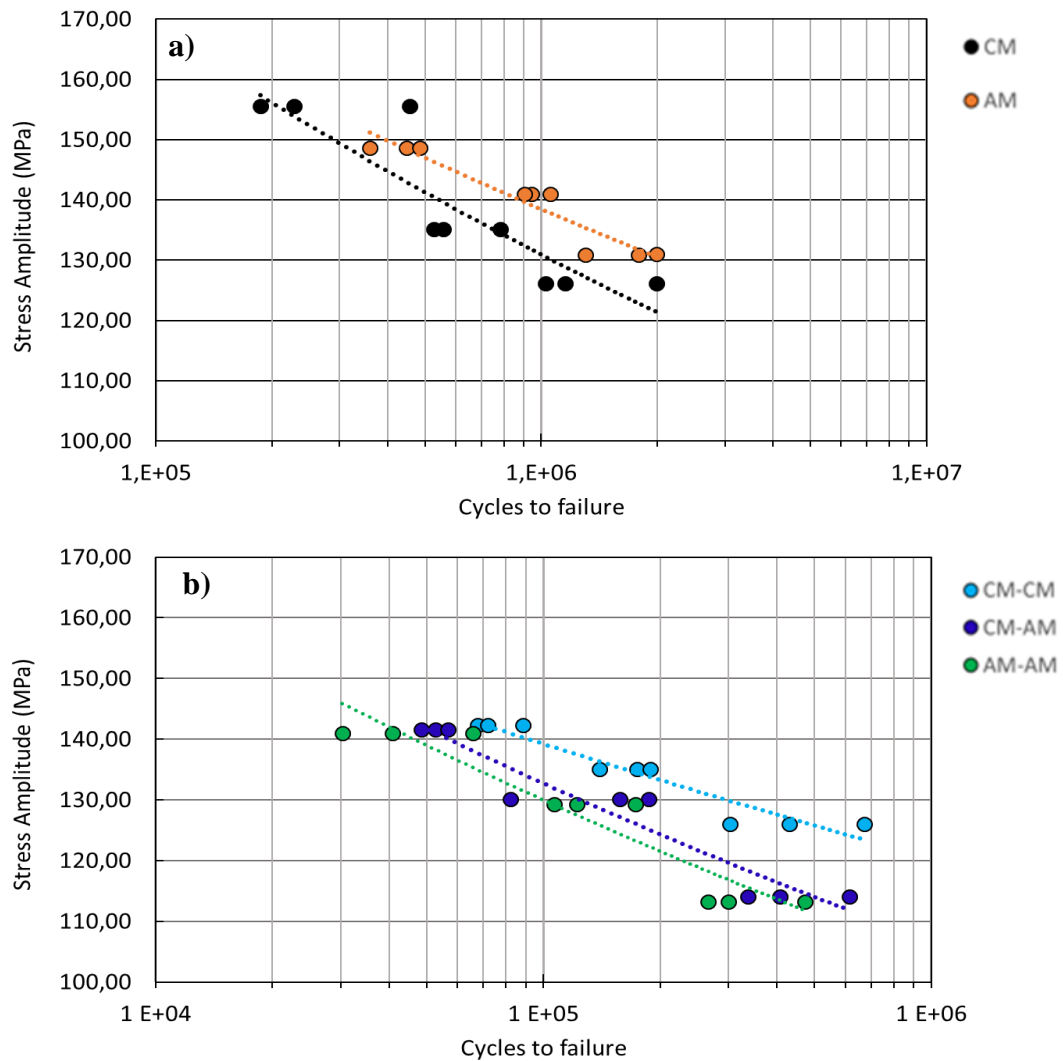
Figure 16 shows the high-cycle fatigue regime (HCF) curves obtained for 3 load levels and 3 repetitions at each load. The fatigue resistance of non welded specimens is higher than those welded. Non-welded AM parts show slightly better fatigue performance than non-welded CM parts, despite the fact that CM and AM parts have almost the same ultimate tensile strength. Nonetheless, for the 3 welded configurations, the curves are close to each other. Although the number of repetitions at each load is only three, the curve of the heterogeneous welding (CM-AM) is framed by the two other configuration (CM-CM & AM-AM) curves and the welded CM specimens have the highest fatigue curve and resistance of the three welded configurations.

As shown in Table 10, welded specimens have approximately a 30% lower endurance limit than the non-welded specimens. The values of the estimated endurance limit are consistent with those obtained in the finite life range. The order of the endurance limit values follows the position of the curves, the highest endurance limit value corresponds to the highest curve.

**Table 10.** Estimation of endurance limits

	CM	AM	CM-CM	CM-AM	AM-AM
Endurance limit estimation (MPa)	122.14	125.92	90.44	88.40	83.85
Standard deviation estimate	5.30	8.56	5.30	5.30	30.27
Validity condition	0.19	0.50	0.22	0.25	1.84

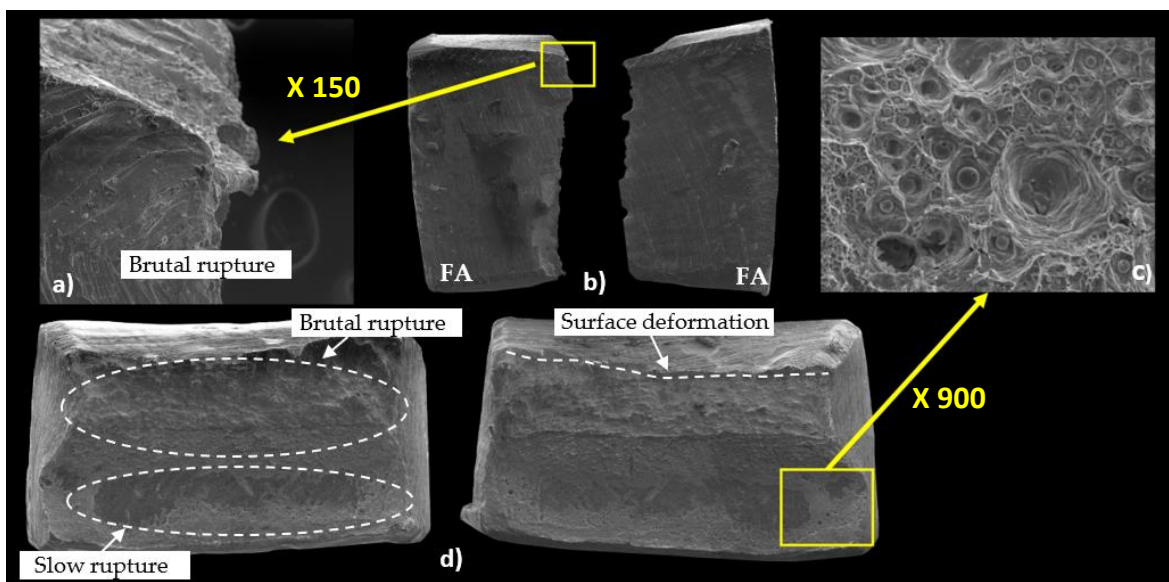
In addition to residual stress caused by welding, the L-PBF process, as described in [33], also generates residual stress mainly due to melting and solidification. Given that all the breaks occurred in the filler material, this aspect has been disregarded.



**Figure 16.** Fatigue finite life range: (a) Non-welded specimens (CM, AM), (b) Welded parts (CM-CM, CM-AM, AM-AM).

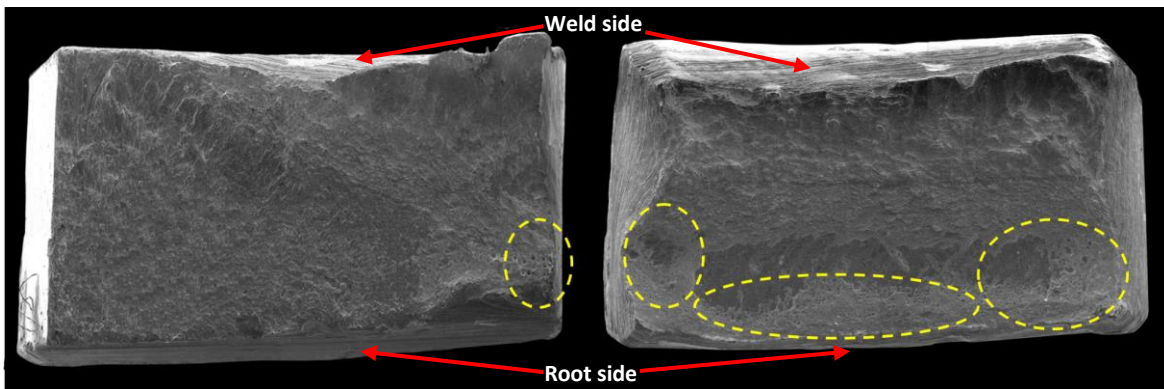
During the staircase test of the AM-AM specimens, one of the specimens failed at a non-expected load and with low number of cycles, which led to the decrease of the endurance limit value and to a fifth load level. This low-load fatigue failure explains the lower endurance limit of the welded configuration AM-AM compared to the other two welded configurations and the value of 30.27 obtained for the standard deviation. The microscopic images of this fatigue failure are reported in Figure 17.

The fracture surfaces show an area reduction (Figure 17) Two main areas are evident: the first presents the gradual crack propagation surface and the second shows the final and brutal fracture surface. The lack of density in the fractured area might justify the rapid rupture of this test specimen. Figure 17, c shows that porosities are present in the fatigue area.



**Figure 17.** SEM images exhibiting the fracture surfaces of fatigue-tested AM-AM specimen: (a) Fracture macrograph on the welding surface (b) Fracture micrograph on the welding surface, (c) Failure surface macrograph, (d) Porosity in the failure surface.

When compared visually with other observed fracture surfaces, this specimen has a more pores (see Figure 18, a-b). It is also remarkable that for all observed fracture surfaces, the surface anomalies are always in the lower part (root surface) of the specimen during welding (Figure18, a-b). This observation could explain that the density of the melt decreases proportionally to specimen depth.



**Figure 18.** Failure surfaces at the staircase method, (a): AM-AM specimen fractured at 1 757 738 cycle (b): AM-AM specimen fractured at 239 732 cycle.

For all samples, the observations of the obtained fractures show that the break is always in the middle of the sample (welded area). However, the fractures are not similar and the distribution of the final fracture area and the crack propagation area vary from one specimen to another.

In their study, Mokhtari et al. [16] suggested that the porosity in the AM specimen welded by the L-PBF process can be transferred to the fusion zone, which can lead to this unexpected rupture. In the present study, the welding was performed manually using the GMAW-P process and the lack of density at the welding bead zone can be explained more easily by a welding defect. In fact, the welding path, the torch angle and proximity are variable all along the specimen's width. Therefore, we suggest that the unexpected rupture obtained was caused by a variation in weld quality.

### 1.3 CONCLUSION

This study evaluates the weldability of 316L stainless steel additive manufacturing parts through tensile and fatigue tests. Welding was performed manually using the GMAW-P process with a filler material EN ISO 14343-A-G 18 8 MN having a ultimate tensile strength 5% lower than that of the 316L stainless steel tested in our research. All welded joints are of the butt joint type. Five configurations of specimens were studied: non-welded AM, AM with butt-welded joint, AM and laser cut (CM) with a butt-welded joint, laser cut (CM) with a butt-welded joint and non-welded laser cut (CM). The tensile properties, high-cycle fatigue life curves and endurance limits were obtained through testing according to the standards ASTM E8/E8M, ASTM E466-15 and ISO 12107: 2003. The fatigue tests were conducted at 20 Hz, with a stress ratio of  $R=0.5$ . For each group of specimens, we performed three tests at three load levels, and we applied the staircase method to determine the endurance limit at two million cycles. The main conclusions of this study are as follows:

1. All static and fatigue fractures occurred in the filler material notwithstanding the HAZ that could affect base material properties.
2. The tensile strengths of the different welded configurations are almost equal with a maximum variation of 1,4% and this is due to the filler material having an ultimate limit almost equal to the 316L stainless steel.
3. In fatigue, the non-welded specimens (AM and CM) have almost the same behavior. In the finite life domain, the difference is less than 10%. The endurance limit at two million cycles, as obtained with the staircase method, are practically equal.
4. The fatigue curves and endurance limits of the welded components are lower than for the two non-welded reference configurations. The two reference configurations give very comparable values with a variation of 3,7 %.
5. For the AM-AM configuration, one unexpected failure occurred where a runout was expected. The endurance limit of this configuration was slightly lower and the



standard deviation was substantially larger than those of the other welded configurations. The analyses of the fracture surface revealed that the failure was due to a welding defect.

Apart from the above unexpected failure, the results indicate that AM parts made of 316L stainless steel can be welded and that the strength of the butt-welded joint, in static and in fatigue, is comparable to that of the welds on specimens made by laser cutting.

This study demonstrates that AM parts made of 316L stainless steel can be welded like laser cut components. The results show for 316L stainless steel that 3D printed parts can be welded with other printed parts or with parts produced by conventional processes with the same level of performance. Moreover, considering that printing chamber space is limited, it may be possible to divide a large part into several pieces, print the different pieces and weld them together. The results also show that it is possible to repair additively manufactured parts by welding without a significant decrease in static and fatigue performance.

Future work may include other experimental designs by changing manufacturing parameters (welding method, material, additive manufacturing parameters, and heat treatment). In addition, the differences in fatigue failure initiation point warrant further investigation.

**Author Contributions:** Conceptualization, H.S. and J.B.; Methodology, H.S., J.B., G.C., S.G and J.D.; validation, J.B.; Investigation, H.S., J.B., C.B.; Writing—original draft preparation, H.S.; Writing—review and editing, J.B. and H.S.; Supervision, J.B. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by NSERC, grant CDEPJ/507533.

**Acknowledgments:** The first author would like to thank Charles-André Fraser, Pedram Farhadipour, Suzie Loubert and Richard Lafrance for their technical support.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## 1.4 REFERENCES

- [1] F2792-12a, A. Standard Terminology for additive Manufacturing Technologies *ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012* **2012**.
- [2] Eyers, D.R.; Potter, A.T. Industrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective. *Computers in Industry* **2017**, *92*, 208-218.
- [3] Klahn, C.; Leutenecker, B.; Meboldt, M. Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* 2015, *36*, 230-235.
- [4] Frazier, W.E. Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance* **2014**, *23*, 1917-1928.
- [5] John, J.J.; Lewandowski, J.J.; Seifi, M. Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties. *ANNUAL REVIEW OF MATERIALS RESEARCH, VOL 46* **2016**, *46*, 151-186.
- [6] Li, J.Z.; Alkahari, M.R.; Rosli, N.A.B.; Hasan, R.; Sudin, M.N.; Ramli, F.R. Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing. *International Journal of Automation Technology* **2019**, *13*, 346-353.
- [7] Yin, S.; Cavaliere, P.; Aldwell, B.; Jenkins, R.; Liao, H.; Li, W.; Lupoi, R. Cold spray additive manufacturing and repair: Fundamentals and applications. *Additive Manufacturing* **2018**, *21*, 628-650.
- [8] Blakey-Milner, B.; Gradl, P.; Snedden, G.; Brooks, M.; Pitot, J.; Lopez, E.; Leary, M.; Berto, F.; du Plessis, A. Metal additive manufacturing in aerospace: A review. *Materials & Design* **2021**, *209*, 110008.
- [9] Vayre, B.; Vignat, F.; Villeneuve, F. Metallic additive manufacturing: state-of-the-art review and prospects. *Mechanics & Industry* **2012**, *13*, 89-96.
- [10] Najmon, J.C.; Raeisi, S.; Tovar, A. 2 - Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*, Froes, F., Boyer, R., Eds.; Elsevier: 2019.
- [11] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* **2016**, *117*, 371-392.
- [12] Vafadar, A.; Guzzomi, F.; Rassau, A.; Hayward, K. Advances in Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges. *Applied Sciences* 2021, *11*, 1213.
- [13] Matilainen Ville-Pekka, V.P.; Pekkarinen, J.; Salminen, A. Weldability of additive manufactured stainless steel. *Physics Procedia* **2016**, *83*, 808-817.
- [14] Mokhtari, M.; Pommier, P.; Balcaen, Y.; Alexis, J. Laser Welding of AISI 316L Stainless Steel Produced by Additive Manufacturing or by Conventional Processes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 2021, *5*, 136.
- [15] Huysmans, S.S.; Peeters, E.; De Prins, K. Weldability study of additive manufactured 316L austenitic stainless steel components-welding of AM with conventional 316L components. *Welding in the World* **2021**, *65*, 1415-1427.

- [16] Madeja Marcin, M.; Madeja, M.; Karoluk, M.; Smolina, I. Welding of Ti-5Al-5Mo-5 V-1Cr-1Fe parts manufactured in the Electron Beam Melting. *Materials and Design* **2020**, *195*.
- [17] Nahmany, M.; Rosenthal, I.; Benishti, I.; Frage, N.; Stern, A. Electron beam welding of AlSi10Mg workpieces produced by selected laser melting additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing* **2015**, *8*, 63-70.
- [18] Liu, R.; Wang, Z.; Sparks, T.; Liou, F.; Newkirk, J. 13 - Aerospace applications of laser additive manufacturing. In *Laser Additive Manufacturing*, Brandt, M., Ed.; Woodhead Publishing: 2017.
- [19] El Hassanin Andrea, A.; El Hassanin, A.; Velotti, C.; Scherillo, F.; Astarita, A.; Squillace, A.; Carrino, L. Study of the solid state joining of additive manufactured components. *2017 IEEE 3RD INTERNATIONAL FORUM ON RESEARCH AND TECHNOLOGIES FOR SOCIETY AND INDUSTRY (RTSI) 2017*, 302-305.
- [20] Laitinen, V. Weldability of powder bed fusion fabricated stainless steel 316L sheets to cold rolled sheet metal. 2015.
- [21] Liverani, E.; Toschi, S.; Ceschini, L.; Fortunato, A. Effect of Selective Laser Melting (SLM) process parameters on microstructure and mechanical properties of 316L austenitic stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology* **2017**, *249*.
- [22] Gu, D.; Shen, Y. Processing conditions and microstructural features of porous 316L stainless steel components by DMLS. *Applied Surface Science* **2008**, *255*, 1880-1887,
- [23] Ahmadi, A.; Mirzaeifar, R.; Moghaddam, N.S.; Turabi, A.S.; Karaca, H.E.; Elahinia, M. Effect of manufacturing parameters on mechanical properties of 316L stainless steel parts fabricated by selective laser melting: A computational framework. *Materials & Design* **2016**, *112*, 328-338.
- [24] Singh, M.; Kumar, R.; Vasudev, H.; Gulati, V.; Singh, M. Methods of improvement of mechanical and tribological properties of the surface of ss 316l: a review. *Int. J. Sci. Technol. Res.* **2019**, *8*, 2023-2027.
- [25] Bedmar, J.; Riquelme, A.; Rodrigo, P.; Torres, B.; Rams, J. Comparison of Different Additive Manufacturing Methods for 316L Stainless Steel. *Materials* **2021**, *14*.
- [26] Pacheco, J.T.; Meura, V.H.; Bloemer, P.R.A.; Veiga, M.T.; de Moura Filho, O.C.; Cunha, A.; Teixeira, M.F. Laser directed energy deposition of AISI 316L stainless steel: The effect of build direction on mechanical properties in as-built and heat-treated conditions. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* **2022**, *4*, 100079.
- [27] Vaz, R.F.; Silvello, A.; Sanchez, J.; Albaladejo, V.; Cano, I.G. The Influence of the Powder Characteristics on 316L Stainless Steel Coatings Sprayed by Cold Gas Spray. *Coatings* **2021**, *11*.

- [28] Mower, T.M.; Long, M.J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A* **2016**, *651*, 198-213.
- [29] Kang, S.-W.; Park, Y.-M.; Jang, B.-S.; Jeon, Y.-C.; Kim, S.-M. Study on fatigue experiment for transverse butt welds under 2G and 3G weld positions. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* **2015**, *7*, 833-847.
- [30] Snyder, P.; Lu, M.-W.; Lee, Y.-L. *Reliability-Based Fatigue Strength Testing by the Staircase Method*; 2004.
- [31] Reijonen, J.; Björkstrand, R.; Riipinen, T.; Que, Z.; Metsä-Kortelainen, S.; Salmi, M. Cross-testing laser powder bed fusion production machines and powders: Variability in mechanical properties of heat-treated 316L stainless steel. *Materials & Design* **2021**, *204*, 109684.
- [32] Ashraf, M.; Gibson, I.; Rashed, M.G. Challenges and prospects of 3d printing in structural engineering. In Proceedings of the 13th International Conference on Steel, Space and Composite Structures (Perth, WA), 2018.
- [33] Simson, T.; Emmel, A.; Dwars, A.; Böhm, J. Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing* **2017**, *17*, 183-189.

## **CHAPITRE 2**

### **ANALYSE DES RÉSULTATS DE FATIGUE**

#### **1.5 INTRODUCTION**

Ce chapitre a pour objectif de reprendre les résultats reliés dans essais les fatigue et de les présenter de façon plus détaillée. Les différentes configurations soudées ont montré des résultats de fatigue similaires avec des écarts limités en termes de limite d'endurance et courbe S-N. Toutefois, pour la configuration FA-FA, il y a eu une rupture à basse charge et à petit nombre de cycles. Cette rupture a eu comme effet de réduire la limite d'endurance et d'augmenter son écart type obtenus en appliquant la méthode de l'escalier. Pour soutenir l'analyse et la recherche des causes, le faciès de rupture de la rupture inattendue sera comparé avec deux autres ruptures afin de voir s'il est possible d'identifier la source de la rupture.

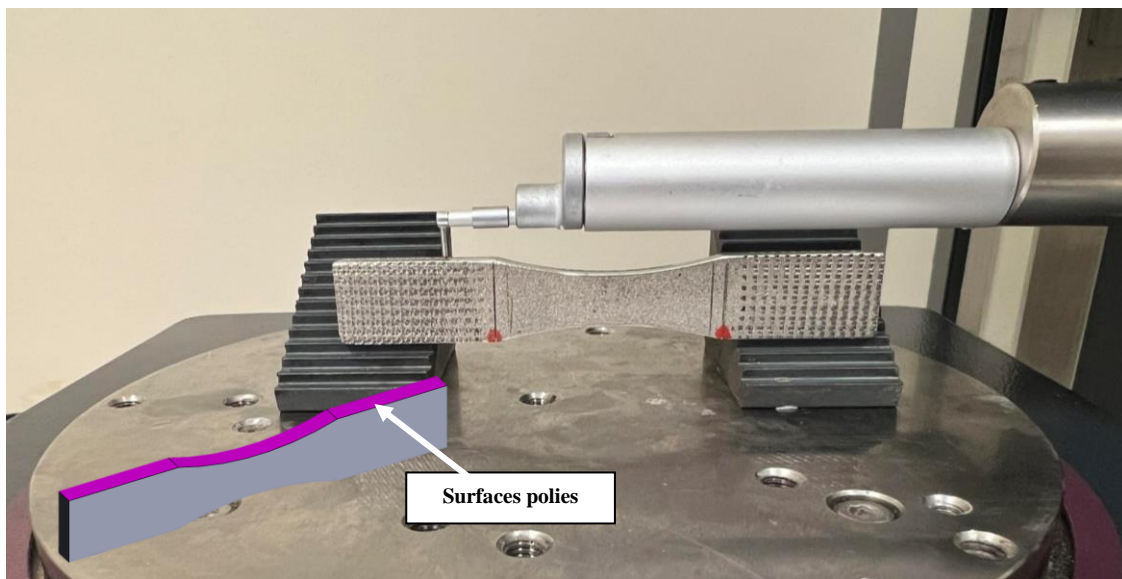
Dans un premier temps, l'effet de l'état de surfaces des éprouvettes soudées et non soudées est discuté. Les étapes de fabrication des spécimens sont rappelées afin d'identifier les aspects qui peuvent avoir un impact sur leur durée de vie.

Ensuite, on compare les faciès de rupture de différentes configurations soudées. L'intention est de voir si des observations reliées aux surfaces cassées (porosité, manque de fusion, déformation) peuvent expliquer les nombres de cycles trouvés durant les essais de fatigue.

Finalement, le procédé de soudage et les propriétés du matériel d'apport seront examinés afin de voir leur importance par rapport à résistance en fatigue des joints soudés. Comme les zones de fusion comportent un fort pourcentage de métal d'apport, il sera donc utile de comparer ses propriétés mécaniques à celle des métaux de base. Dans la revue de littérature, la plupart des travaux consultés utilisent le soudage laser alors que dans la présence étude c'est le soudage manuel qui a été utilisé. Pour cette raison, il est difficile de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec ceux trouvés dans la littérature.

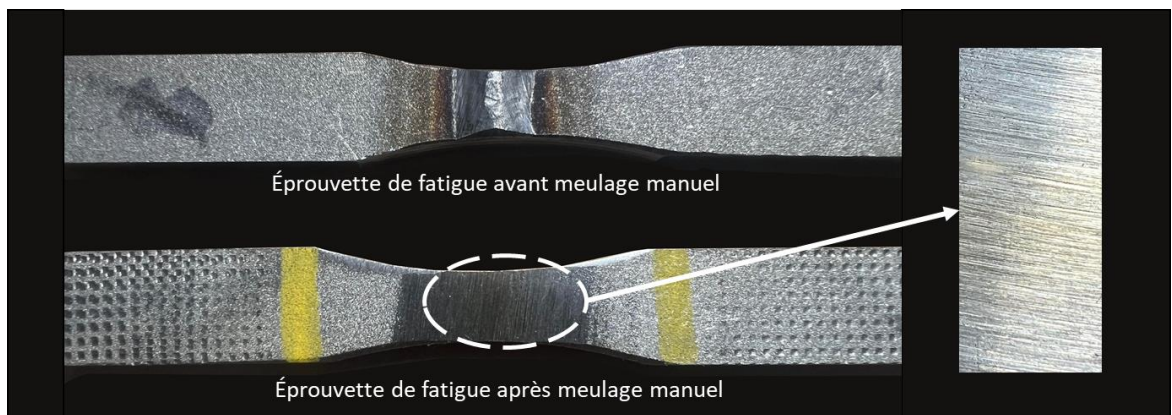
## 1.6 ÉTAT DE SURFACE

Les éprouvettes de fatigue des configurations soudées ont été fabriquées à partir de demi-spécimens rectangulaires imprimés en 3D ou découpés par laser. Lors du soudage des différentes configurations, des pièces sacrificielles ont été intégrées pour éliminer les effets de bord. Une fois le soudage fait, les éprouvettes ont subi un contournage par usinage numérique afin d'obtenir la forme finale. Un polissage manuel a par la suite été appliqué sur les tranches (voir figure 17). Par précaution et afin de ne pas avoir à tenir compte de l'effet du fini de surface dans l'analyse des résultats, l'usinage et le polissage a aussi été pratiqué de la même manière sur les éprouvettes de fatigue non soudées afin de garantir un fini de surface similaire. Mis à part l'élimination par meulage manuel de la surépaisseur du cordon de soudage des éprouvettes de traction et de fatigue (voir figure 18), aucune autre modification n'a été faite.



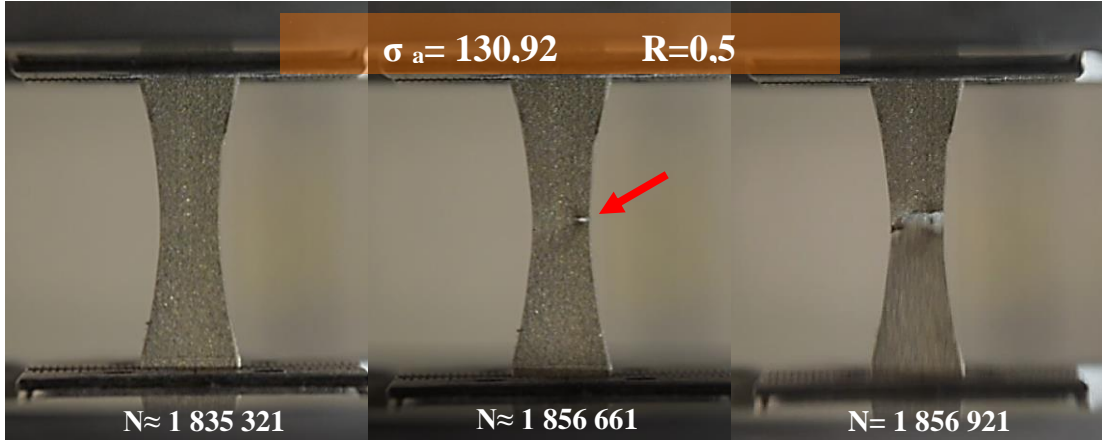
**Figure 6.** Mesure de rugosité des éprouvettes de fatigue

L'état de surface est un facteur important pour les essais de fatigue. Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer l'effet de ce facteur. Dans leur recherche, Shrestha et al. [14] ont traité le sujet pour l'acier 316L imprimé en 3D. Ils ont montré que la présence des défauts de manque de fusion impacte plus les résultats des essais mécaniques y compris celui de fatigue en comparaison avec le facteur de fini de surface. Dans notre étude, toutes les configurations ont été traitées de façon à avoir un fini de surface similaire.



**Figure 20.** Éprouvette de fatigue FA-FA avant et après l'élimination du cordon de soudage

Suite à l'opération de polissage et comme le montre le tableau 6 du chapitre 1 pour les deux configurations, les mesures de rugosité ont donné des valeurs très proches ce qui rend le facteur de l'état de surface moins important par rapport à l'effet que celui peut avoir sur le comportement en fatigue. Il faut aussi mentionner que toutes les éprouvettes (soudés et non soudés) se sont cassées au milieu (voir figure 19). De plus, dans les cas des éprouvettes soudées, les ruptures ont eu lieu dans le matériel d'apport. Autrement dit, s'il y avait des défauts surfaciques, la possibilité d'avoir des ruptures décalées du milieu aurait augmenté même si la section la plus petite est au centre, ce qui n'a pas été le cas. L'annexe I montre les résultats détaillés des mesures de rugosité pour les éprouvettes non soudées.



**Figure 21.** Position de rupture d'une éprouvette de fatigue FA, N= 1 856 921

## 1.7 SOUDAGE ET BAIN DE FUSION

Comme c'est habituellement le cas pour les essais en fatigue, certains tests ont eu des durées de vie assez basses. Lors des tests faits dans le but de déterminer la limite d'endurance par la méthode de l'escalier, une éprouvette soumise à une contrainte alternée relativement basse s'est rompue après un nombre de cycles loin des deux millions attendus. Il s'agissait d'un spécimen soudé composé de deux composants imprimés (FA-FA). En effet au cours de la méthode de l'escalier, on note les contraintes alternées, les ruptures et les non-ruptures. Pour le cas qui nous intéresse, on s'attendait à une non-rupture après deux millions de cycle. Le tableau 7 présente les résultats obtenus lors de l'application de la méthode de l'escalier pour la configuration FA-FA.



**Table 11.** Estimation de la limite d'endurance pour la configuration FA-FA

Amplitude de contrainte (MPa)	Essai (Éprouvette)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
98,78		X					239732 Cycles		
88,78	O		X		X				
78,78				O		X			
67,85							X		O
57,85								O	

O : Non-Rupture ( $N > 2\,000\,000$  cycles)

X : Rupture ( $N < 2\,000\,000$  cycles)

La rupture inattendue du septième spécimen a fait baisser la valeur de la limite d'endurance estimée, a fait augmenter le nombre des niveaux de charges et a fait augmenter l'écart type de la limite d'endurance. Au chapitre 1, la porosité dans la zone soudée avait été proposée pour expliquer cette rupture. Afin de déterminer les causes principales de cette rupture, des images de deux autres faciès de ruptures ont été prises à des fins de comparaison.

Pour essayer de mieux comprendre la rupture de l'essai 7 de la configuration FA-FA, le faciès de rupture (figure 20-a) a été comparé avec ceux d'autres essais et d'autres configurations soudées (FC-FC et FA-FC).

Quelques entailles dans les surfaces extérieures sont observées (voir ellipse orange), ces formes sont probablement dues au meulage manuel effectué sur les deux côtes des surfaces des éprouvettes pour enlever le dépassement de matière du cordon de soudure. Ceci peut être la raison d'amorçage de rupture pour quelques éprouvettes.

La figure 20-b montre les faciès de rupture d'un spécimen FC-FA après 1 281 278 cycles. La surface observée n'est pas plane, cette dernière comporte une dénivellation causée par un arrachement de matière (ellipse rouge) localisé dans la partie inférieure de l'éprouvette. Les répartitions des zones de fatigue et de rupture brutale peuvent être différenciées.

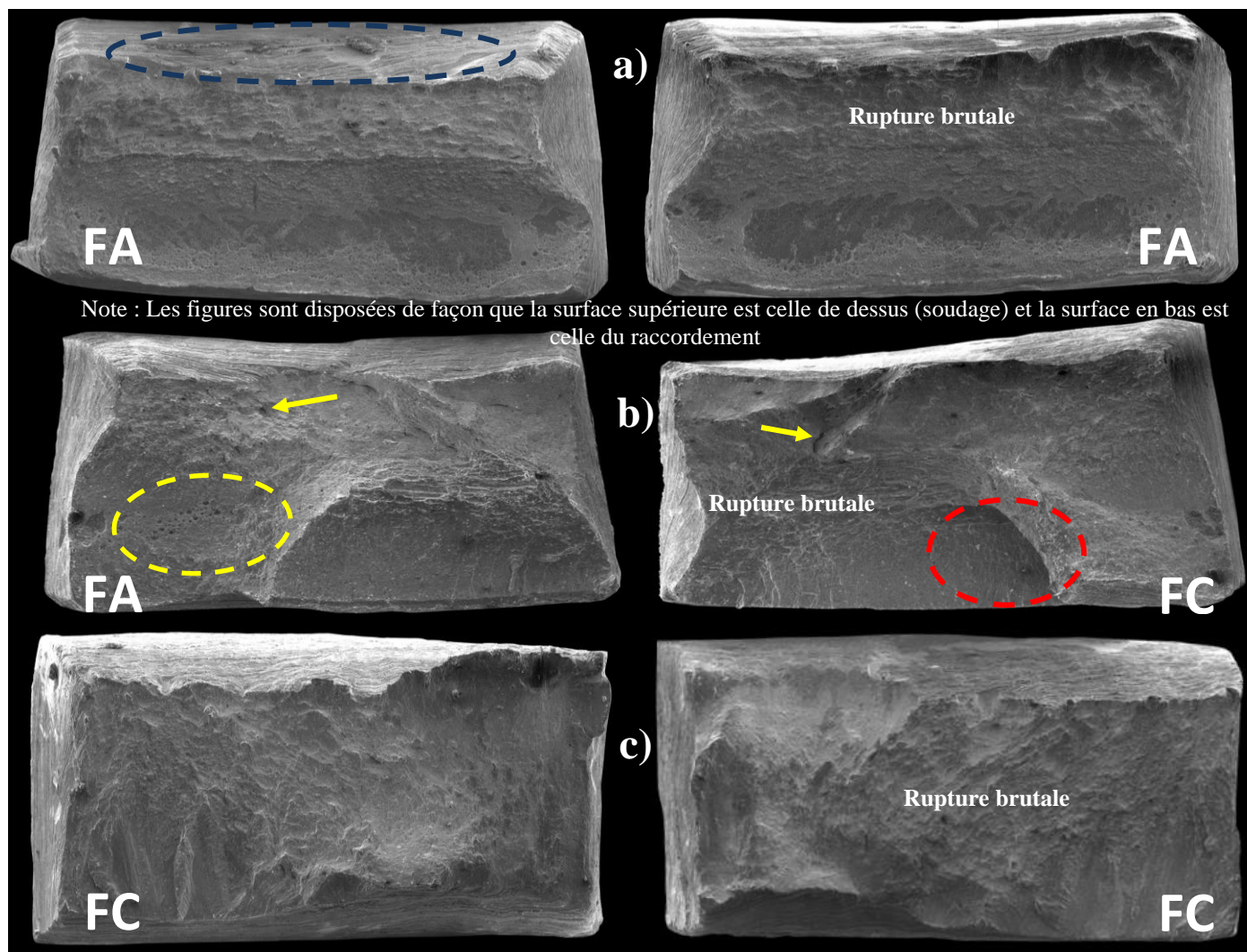
On constate qu'il a plus de porosité du côté FA que du côté FC (voir ellipse jaune). Par contre la surface du côté FC comporte des défauts de manque de fusion qui se manifestait par des trous (voir flèches jaunes).

Comme trouvé dans les résultats de l'essai de fatigue (voir figure 15 chapitre 1), la courbe d'endurance de la configuration FC-FA est encadrée par les deux autres courbes des configurations soudées (FA-FA et FC-FC) sachant que la configuration FC-FC est la plus résistante. On peut alors constater que le côté imprimé est moins résistant dans le cas de soudage hétérogène.

La figure 20-c présente une surface de rupture d'une éprouvette FC-FC avec 1 166 824 cycles. En comparaison avec les autres configurations, les surfaces de rupture présentent une haute densité. C'est pourquoi moins de porosité est détectée.

Les faciès de ruptures observés sont exempts de défauts et partiellement plans contrairement à celles dans la figure 20-b. En plus, la zone de rupture brutale est limitée, cette zone se caractérise par une déformation plastique plus importante. Ceci peut indiquer que le bain de fusion est exempt des discontinuités de matière dans quelques zones.

On peut finalement supposer que les défauts de soudage dans la zone de fusion impactent significativement les résultats des essais de fatigue. Le meulage manuel peut aussi être un facteur important comme les traces créées (stries) peuvent initier l'amorçage (ellipse bleu).

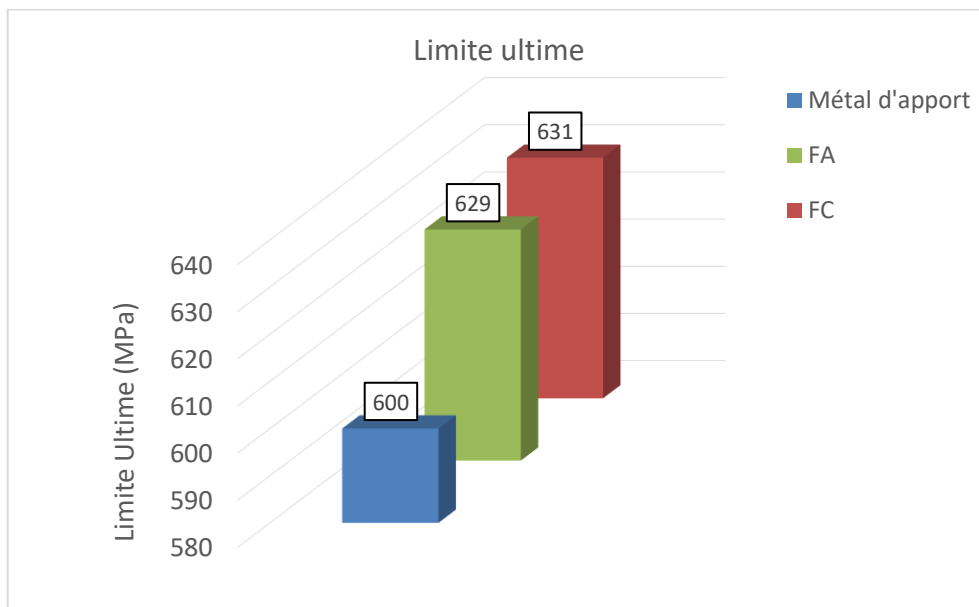


**Figure 22.** Surface de rupture des spécimens de fatigue: (a) FA-FA avec  $N=239\ 732$ , (b) FA-FC avec  $N=1\ 281\ 278$ , (c) FC-FC avec  $N=1\ 166\ 824$

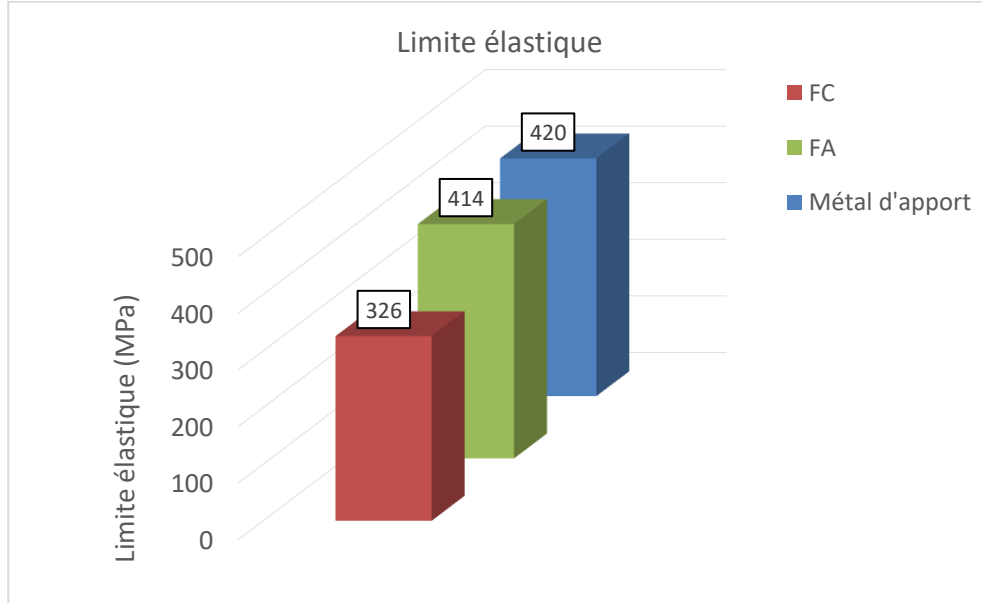
## 1.8 MÉTHODE DE SOUDAGE ET MATÉRIEL D'APPORT

La méthode de soudage GMAW manuel utilisée a été choisie parce qu'elle est adaptée aux petites séries. Il est vrai que le soudage laser est plus performant en termes de qualité de soudure [15,16], mais le choix d'utiliser le procédé GMAW a été fait après des discussions avec notre partenaire.

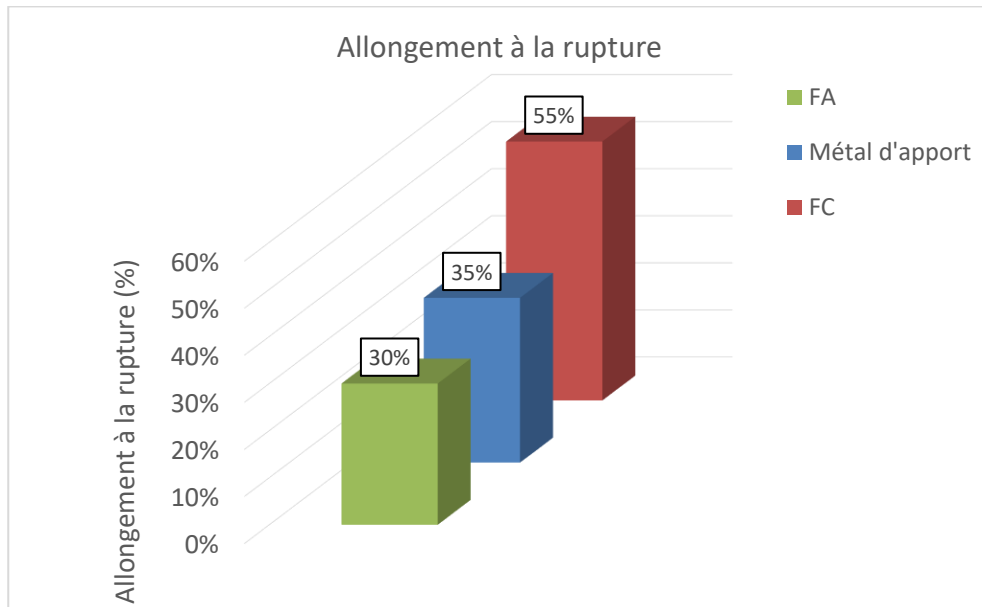
Le matériel d'apport EN ISO 14343-A-G 18 8 MN possède une limite ultime plus basse que celle de l'acier inoxydable 316L en feuille ou en issue de la fabrication additive (voir figure 21). Ceci a nécessairement une incidence sur les résultats trouvés malgré que la zone fusionnée comporte un mélange des matériaux de base et d'apport. Les figures 22 et 23 montrent les écarts entre les 3 matériaux en termes de limite ultime, de limite élastique et d'allongement à la rupture.



**Figure 23.** Comparaison des limites ultimes



**Figure 24.** Comparaison des limites élastiques



**Figure 25.** Comparaison des allongements à la rupture

## 1.9 CONCLUSION

Généralement le soudage est un procédé qui diminue les propriétés mécaniques des métaux de base y compris les matériaux issus de la fabrication additive. Comme la zone de fusion est un mélange de deux matériaux ou plus, elle représente habituellement pour des sollicitations en fatigue le maillon faible de l'éprouvette. Mais il peut y avoir d'autres facteurs agissant sur les valeurs admissibles (limite ultime, dureté, limite d'endurance ...) comme la qualité de poudre, le traitement thermique, les paramètres d'impression, le procédé de soudage, etc. [17].

Dans cette étude, les valeurs trouvées lors des essais de traction et de fatigue étaient similaires pour les 3 configurations soudées. Comme les différents autres facteurs discutés dans ce chapitre sont considérés non significatifs, on peut dire que la baisse des propriétés de fatigue (limite d'endurance et courbe S-N) pour la configuration FA-FA est possiblement due à un manque de qualité de soudage. Cela ramène la qualité de soudage comme un facteur ayant beaucoup d'importance sur la résistance d'un joint soudé. En effet, la rupture en fatigue à basse charge n'a pas été répétée et un seul test est responsable de la baisse de la limite d'endurance de la configuration FA-FA.

Il apparaît très peu probable que la rupture inattendue de la configuration FA-FA soit causée par un défaut d'impression (L-PBF). La rupture inattendue, comme toutes les autres ruptures, a eu lieu dans la zone soudée et dans le matériel d'apport. Par ailleurs, le polissage manuel effectué pour enlever le cordon de soudure pourrait avoir créé une petite entaille et avoir favorisé une amorce de rupture.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Avec le développement de plusieurs technologies prometteuses, la fabrication additive se présente de plus en plus dans les lignes de production des industries mondiales. Ceci rappelle le besoin d'intégrer les produits résultant dans des assemblages surtout que l'espace de travail des machines est limité, d'où la possibilité d'utiliser le soudage pour joindre un composant additif à un autre ou à un composant conventionnel. Dans le but de prévoir la fiabilité du soudage manuel des pièces en 316L issues de la fabrication additive métallique par L-PBF, une série des essais mécaniques est élaborée afin de comparer ce soudage à celui ordinaire (composants conventionnels). La méthodologie proposée compte à expérimenter la résistance en traction et en fatigue des différentes modes de soudage incluant des coupons imprimés 3D et conventionnels. Les propriétés mécaniques des éprouvettes non soudées ont été aussi examinées pour jouer le rôle des configurations de référence.

Il a été démontré par plusieurs études précédentes que le soudage du 316L imprimé en 3D est faisable avec des propriétés mécaniques statiques comparables au conventionnel. Notre étude s'est intéressée à refaire des essais statiques et d'ajouter des essais de fatigue. La mesure des propriétés en fatigue est très importance dans de très nombreuses applications. À ce propos le plan d'expériences effectué met en évidence la comparaison des trois configurations soudées et des deux configurations non soudées (éprouvettes de fabrication additive et éprouvettes obtenues par découpe laser). Les résultats ont montré que les éprouvettes soudées de fabrication additive (configuration FA-FA) avaient un comportement en fatigue comparable à celles soudées fabriquées par découpe laser (configuration FC-FC), mis à part une rupture inattendue des éprouvettes FA-FA possiblement due à un défaut de soudage ou à une entaille de meulage.

## SOMMAIRE

En conclusion, les résultats montrent que l'acier inoxydable 316L issu de la fabrication additive (frittage sur lit de poudre) possède une soudabilité comparable à celle de l'acier 316L laminé à froid.

Les résultats des essais mécaniques étaient proches pour toutes les configurations. En fatigue, les joints soudés incluant au moins une moitié fabriquée par L-PBF ont montré des résultats légèrement inférieurs à la configuration qui présente le soudage homogène FC-FC. Cet écart est de -7% pour la configuration FA-FA et de -2% pour la configuration FA-FC. La différence de 7% s'explique par une rupture inattendue lors des essais visant à déterminer la limite d'endurance avec la méthode de l'escalier. L'hypothèse la plus probable pour expliquer cette rupture est un défaut de soudage. Le meulage manuel appliqué sur les éprouvettes peut également être une cause de rupture et peut engendrer une variabilité dans les résultats.

Les résistances statiques en termes de limite ultime des éprouvettes non soudées de fabrication additive et conventionnelle sont quasiment égales, à 0,3% près. Il faut toutefois noter que la ductilité des éprouvettes non soudées de FA est environ deux fois plus petite que celle des éprouvettes fabriquées par découpe laser (FC : 55% et FA : 30%).

Les essais de micrographie et microdureté ont contribué à justifier les résultats obtenus. La dureté dans la zone soudée diminue pour toutes les configurations, ce qui est cohérent aux résultats de fatigue. Des changements microstructuraux sont apportés sur le matériau de base avec le soudage, la zone de fusion et celle affectée thermiquement montrent un profil macrographique différent. Quelques défauts de fusion sont détectés par des pores (discontinuité de matière) leur nombre. Finalement l'étude macrographique a aidé à évaluer la qualité de soudage, les cordons de soudage étaient exempts de fissures.



## **CONTRIBUTION**

Le soudage des pièces issues de la fabrication additive est une pratique très peu utilisée dans les domaines industriels. Par exemple notre partenaire, grand donneur d'ordre, l'interdit en justifiant le manque de données concernant la soudabilité des alliages disponible pour l'impression 3D. En effet plusieurs exigences liées à l'intégration des composants additifs peuvent s'appliquer dans diverses applications comme les nouveaux produits, la réparation et les outillages de fabrication, etc.

À notre connaissance, pour le 316L qui est un matériau très utilisé par les technologies de FA, il n'y a pas des données disponibles par rapport à sa soudabilité et à ses propriétés en fatigue lorsqu'il est soudé (courbe S-N et limite d'endurance).

Le plan d'expériences effectué dans ce travail a comporté des essais de fatigue pour cinq configurations dont deux qui incluent des pièces FA soudées. Les résultats démontrent la soudabilité des pièces FA en 316L avec des propriétés comparables au soudage du 316L conventionnel. Ceci n'était pas fait dans des recherches antérieures. Les admissibles fournies pourraient être utilisées pour qualifier la résistance en fatigue des pièces L-PBF soudées.

## **PERSPECTIVES**

Le travail effectué a permis de montrer que les propriétés mécaniques qui sont parmi les critères importants pour choisir le procédé adéquat de fabrication ne subissent pas une diminution significative quand on soude du 316L imprimé 3D. Cet acier issu du procédé L-PBF puis soudé donne des résultats similaires à celui conventionnel soudé en terme traction et fatigue.

Tenant compte que le plan comparatif élaboré dans cette étude est fait dans les cas ordinaires, c'est-à-dire aucune variation par rapport aux paramètres de fabrication, les prochains travaux peuvent proposer deux familles de plan d'expériences :

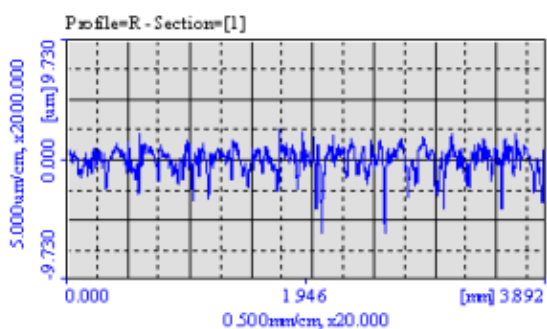
- Variation des paramètres de fabrication additive : puissance laser, Vitesse laser, distance entre les hachures.
- Effectuer le même travail en utilisant le soudage laser comme procédé d'assemblage, ce dernier étant plus performant dans certains cas.
- Variation des paramètres de soudage : puissance laser, gaz de protection, métal d'apport ...
- Variation des applications de post-traitement (polissage, traitement thermique).
- Effectuer des essais de fatigue avec un nombre de tests plus élevé afin d'éliminer le doute causé par la rupture inattendue et ainsi pouvoir confirmer les résultats trouvés. De plus le travail sur l'identification des points d'amorçage pourrait servir à mieux expliquer les résultats.
- Mieux contrôler la fabrication des spécimens telle que l'élimination des applications manuelles comme le meulage afin de garantir une répétabilité maximale et le remplacer par un procédé automatique (polissage automatisé).
- Procéder à des analyses plus approfondies des surfaces de rupture et de la microstructure de la zone soudée.
- Conduire une étude de cas afin de comparer le comportement mécanique de deux composantes soudées, l'une fabriquée entièrement avec des procédés conventionnels et l'autre par des procédés mixtes (FA et fabrication conventionnelle).

Tenant compte que l'acier 316L issu de la FA et du procédé L-PBF est soudable avec des admissibles comparables à celles de l'acier 316 L conventionnels (laminé à froid),

d'autres aspects tels que le procédé de soudage, les procédures de soudage, le type de joint, doivent maintenant être étudiés.

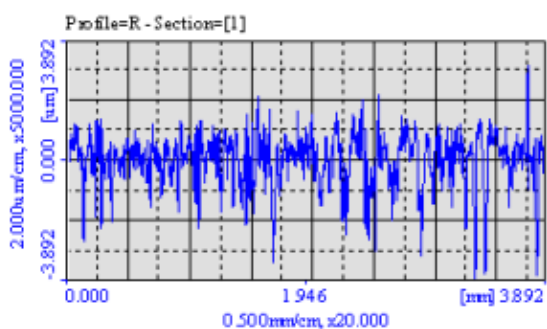


## ANNEXE I



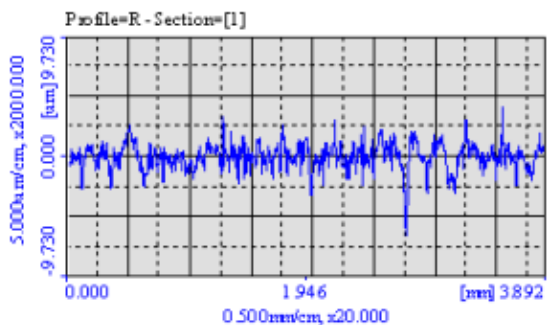
Parameter Sum Table

	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (µm)	0.786	0.786
Ry (µm)	6.503	6.503
Rz (µm)	4.531	4.531



Parameter Sum Table

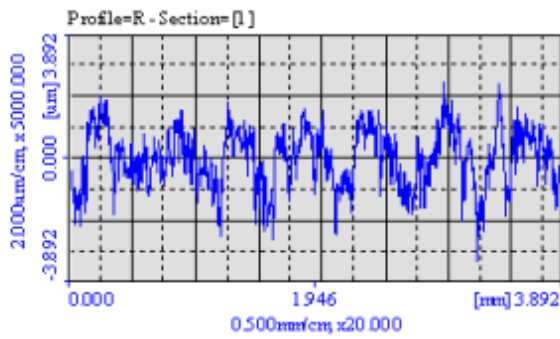
	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (µm)	0.614	0.614
Ry (µm)	5.136	5.136
Rz (µm)	3.740	3.740



Parameter Sum Table

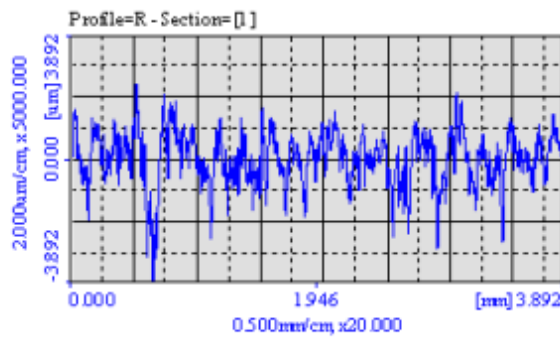
	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (µm)	0.769	0.769
Ry (µm)	6.417	6.417
Rz (µm)	4.229	4.229

Figure I.1 Résultats de la mesure de rugosité pour une éprouvette FA après polissage



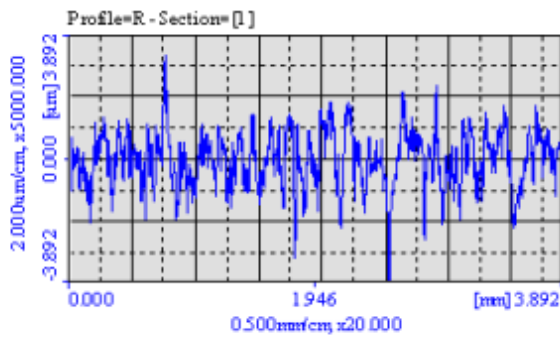
Parameter Sum Table

	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (um)	0.748	0.748
Ry (um)	4.486	4.486
Rz (um)	3.001	3.001



Parameter Sum Table

	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (um)	0.639	0.639
Ry (um)	4.671	4.671
Rz (um)	3.087	3.087



Parameter Sum Table

	Profile=R - Section=[1]	Average Value
Ra (um)	0.669	0.669
Ry (um)	4.848	4.848
Rz (um)	3.253	3.253

Figure I.2 Résultats de la mesure de rugosité pour une éprouvette FC après polissage

## **ANNEXE II**

### **Tableaux récapitulatifs des résultats des essais de fatigue et méthodes de l'escalier effectuées**

L'annexe II illustre les différents résultats des essais de fatigue pour la détermination de la courbe de fatigue finie ainsi que la méthode de l'escalier.

Tableau II.1 : Récapitulatif des essais de fatigue de la configuration FC

Numéro de l'expérience	Section nominale (mm <sup>2</sup> )	Charge max (N)	Charge min (N)	Contrainte alternée (MPa)	Nombre de cycles
1	37,36	18844,68	9422,34	126,10	1154660
2		18844,68	9422,34	126,10	1990386
3		18844,68	9422,34	126,10	1026037
4		20190,73	10095,37	135,11	781237
5		20190,73	10095,37	135,11	556342
6		20190,73	10095,37	155,58	525654
7		23249,93	11624,97	155,58	456392
8		23249,93	11624,97	155,58	186515
9		23249,93	11624,97	155,58	228762
10		17131,53	8565,76	114,64	2000000
11		18625,93	9312,96	124,64	1494884
12		17131,53	8565,76	114,64	2000000
13		18625,93	9312,96	124,64	2000000
14		20249,58	10124,79	134,64	1166824
15		18625,93	9312,96	124,64	1599188
16		17131,53	8565,76	114,64	2000000
17		18625,93	9312,96	124,64	1019418
18		17131,53	8565,76	114,64	2000000

Tableau II.2 : Méthode de l'escalier de la configuration FC

Amplitude de contrainte (MPa)	Essai (Éprouvette)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
98,78					X				
88,78		X		O		X		X	
78,78	O		O				O		O



Tableau II.3 : Récapitulatif des essais de fatigue de la configuration FA

Numéro de l'expérience	Section nominale (mm <sup>2</sup> )	Charge max (N)	Charge min (N)	Contrainte alternée (MPa)	Nombre de cycles
1	32,00	16757,83	8378,91	130,92	1300000
2		16757,83	8378,91	130,92	1787666
3		16757,83	8378,91	130,92	2000000
4		19022,32	9511,16	140,99	945424
5		19022,32	9511,16	140,99	1055074
6		19022,32	9511,16	140,99	904199
7		18046,82	9023,41	148,61	358424
8		18046,82	9023,41	148,61	446167
9		18046,82	9023,41	148,61	484661
10		15477,76	7738,88	120,92	2000000
11		16757,76	8378,88	130,92	1856921
12		15477,76	7738,88	120,92	1769260
13		14197,76	7098,88	110,92	2000000
14		15477,76	7738,88	120,92	2000000
15		16757,76	8378,88	130,92	1726800
16		15477,76	7738,88	120,92	2000000
17		16757,76	8378,88	130,92	2000000
18		18037,76	9018,88	140,92	774624

Tableau II.4 : Méthode de l'escalier de la configuration FC

Amplitude de contrainte (MPa)	Essai (Éprouvette)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
140,92									X
130,92		X				X		O	
120,92	O		X		O		O		
110,92				O					

Tableau II.5 : Récapitulatif des essais de fatigue de la configuration FC-FC

Numéro de l'expérience	Section nominale (mm <sup>2</sup> )	Charge max (N)	Charge min (N)	Contrainte alternée (MPa)	Nombre de cycles
1	35,42	17859,05	8929,52	126,05	302136
2		17859,05	8929,52	126,05	430277
3		17859,05	8929,52	126,05	671339
4		19134,69	9567,35	135,06	174181
5		19134,69	9567,35	135,06	139223
6		19134,69	9567,35	135,06	188172
7		20163,41	10081,71	142,32	67704
8		20163,41	10081,71	142,32	71894
9		20163,44	10081,72	142,32	88531
10		11161,55	5580,78	78,78	2000000
11		12578,35	6289,18	88,78	1078260
12		11161,55	5580,78	78,78	2000000
13		12578,35	6289,18	88,78	2000000
14		13995,15	6997,58	98,78	1166824
15		12578,35	6289,18	88,78	2000000
16		13995,15	6997,58	98,78	1757170
17		12578,35	6289,18	88,78	2000000
18		13995,15	6997,58	98,78	2000000

Tableau II.6 : Méthode de l'escalier de la configuration FC

Amplitude de contrainte (MPa)	Essai (Éprouvette)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
98,78					X		X		O
88,78		X		O		O		O	
78,78	O		O						

Tableau II.7 : Récapitulatif des essais de fatigue de la configuration FC-FA

Numéro de l'expérience	Section nominale (mm <sup>2</sup> )	Charge max (N)	Charge min (N)	Contrainte alternée (MPa)	Nombre de cycles
1	37,36	14597,10	7298,55	114,04	52690
2		14597,10	7298,55	114,04	56611
3		14597,10	7298,55	114,04	48321
4		16662,73	8331,37	130,18	82176
5		16662,73	8331,37	130,18	157010
6		16662,73	8331,37	130,18	186884
7		18128,62	9064,31	141,63	337337
8		18128,62	9064,31	141,63	406938
9		18128,62	9064,31	141,63	614319
10		11315,20	5657,60	88,40	2000000
11		12595,20	6297,60	98,40	1358185
12		11315,20	5657,60	88,40	2000000
13		12595,20	6297,60	98,40	1281278
14		11315,20	5657,60	88,40	1915844
15		10035,20	5017,60	78,40	2000000
16		11315,20	5657,60	88,40	1775329
17		10035,20	5017,60	78,40	2000000
18		11315,20	5657,60	88,40	2000000

Tableau II.8 : Méthode de l'escalier de la configuration FC-FA

Amplitude de contrainte (MPa)	Essai (Éprouvette)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
98,78		X		X					
88,78	0		0		X		X		0
78,78						0		0	



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Bourella, D.L.; Beaman, J.J.; Leub, M.C.; Rosenc, D.W. History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing : Looking Back and Looking Ahead.
- [2] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B. *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*; 2010; Volume 5.
- [3] Herzog, D.; Seyda, V.; Wycisk, E.; Emmelmann, C. Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia* **2016**, *117*, 371-392.
- [4] F2792-12a, A. Standard Terminology for additive Manufacturing Technologies *ASTM International , West Conshohocken , PA , 2012* **2012**.
- [5] Attaran, M. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business horizons* **2017**, *60*, 677-688.
- [6] Klahn, C.; Leutenecker, B.; Meboldt, M. Design Strategies for the Process of Additive Manufacturing. *Procedia CIRP* **2015**, *36*, 230-235.
- [7] Reijonen, J.; Björkstrand, R.; Riipinen, T.; Que, Z.; Metsä-Kortelainen, S.; Salmi, M. Cross-testing laser powder bed fusion production machines and powders: Variability in mechanical properties of heat-treated 316L stainless steel. *Materials & Design* **2021**, *204*, 109684.
- [8] Huysmans, S.; Peeters, E.; De Prins, K. Weldability study of additive manufactured 316L austenitic stainless steel components-welding of AM with conventional 316L components. *Welding in the World* **2021**, *65*, 1415-1427.
- [9] Laitinen, V. Weldability of powder bed fusion fabricated stainless steel 316L sheets to cold rolled sheet metal. 2015.
- [10] Matilainen Ville-Pekka, V.P.; Matilainen, V.P.; Pekkarinen, J.; Salminen, A. Weldability of additive manufactured stainless steel. *Physics Procedia* **2016**, *83*, 808-817.

- [11] El Hassanin Andrea, A.; El Hassanin, A.; Velotti, C.; Scherillo, F.; Astarita, A.; Squillace, A.; Carrino, L. Study of the solid state joining of additive manufactured components. *2017 IEEE 3RD INTERNATIONAL FORUM ON RESEARCH AND TECHNOLOGIES FOR SOCIETY AND INDUSTRY (RTSI)* **2017**, 302-305.
- [12] Mokhtari, M.; Pommier, P.; Balcaen, Y.; Alexis, J. Laser Welding of AISI 316L Stainless Steel Produced by Additive Manufacturing or by Conventional Processes. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* **2021**, 5, 136.
- [13] Liu, R.; Wang, Z.; Sparks, T.; Liou, F.; Newkirk, J. 13 - Aerospace applications of laser additive manufacturing. In *Laser Additive Manufacturing*, Brandt, M., Ed.; Woodhead Publishing: 2017.
- [14] Shrestha, R.; Simsiriwong, J.; Shamsaei, N. Fatigue behavior of additive manufactured 316L stainless steel parts: Effects of layer orientation and surface roughness. *Additive Manufacturing* **2019**, 28, 23-38.
- [15] Neto, F.S.; Neves, D.; Silva, O.M.M.; Lima, M.S.F.; Abdalla, A.J. An Analysis of the Mechanical Behavior of AISI 4130 Steel after TIG and Laser Welding Process. *Procedia Engineering* **2015**, 114, 181-188,
- [16] Yan, J.; Gao, M.; Zeng, X. Study on microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel joints by TIG, laser and laser-TIG hybrid welding. *Optics and Lasers in Engineering* **2010**, 48, 512-517.
- [17] Mooney, B.; Kourousis, K.I. A Review of Factors Affecting the Mechanical Properties of Maraging Steel 300 Fabricated via Laser Powder Bed Fusion. *Metals* **2020**, 10.